

В. П. Володин

Экструзия профильных изделий из термопластов

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПРОФЕССИЯ

Санкт-Петербург
2005

3
14
15
16
17
18
18
19
20
20
20
23
29

31
31
32
33
34
36
36
37
38
39
43
43
45
46
49
51
51
52
54
54

56
56
60
65
65
68
70
76

УДК 678.027.3

ББК 35.712

В 67

В. П. Володин

В 67 Экструзия профильных изделий из термопластов. — СПб.: Профессия, 2005. — 480 с., ил., табл., сх.

ISBN 5-93913-076-3

В практическом руководстве на современном уровне рассмотрены основные типы и особенности технологии экструзии профильных изделий из термопластов. Подробно освещены вопросы влияния качества исходного сырья и выбранных технологий на готовые изделия. Для практических работников особенно ценными станут рекомендации по производству конкретных типов профильных изделий.

Книга предназначена для разработчиков, проектировщиков, инженеров, технологов и руководителей предприятий индустрии пластмасс.

УДК 678.027.3

ББК 35.712

ISBN 5-93913-076-3

© Володин В. П., 2005

© Изд-во «Профессия», 2005

Володин В. П.

ЭКСТРУЗИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ

Издание осуществлено при участии ЗАО «Петропринт»
191180, Санкт-Петербург, ул. Бородинская, д. 4В

Ответственный редактор *И. Артемьева*
Художественный редактор *А. Андриенко*
Верстка *И. Артемьева*
Корректор *О. Камнева*

ISBN 5-93913-076-3

Лицензия № ИД 00469 от 25.11.1999 г.

Подписано к печати 1.06.2005. Тираж 2 тыс. экз.

Формат 70 × 100¹/16. Усл. печ. л. 30.

Бумага офсетная. Заказ 195

Издательство «Профессия»

Санкт-Петербург, 191002, а/я 600

Тел./факс: (812) 740-12-60. URL: www.professija.ru,

e-mail: bookpost@professija.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Техническая книга»
190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29

Оглавление

Предисловие	7
ГЛАВА 1. ЭКСТРУЗИОННЫЕ ПРОФИЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ	11
1.1. Назначение, области применения и классификация профильных изделий	11
1.2. Материалы для производства профильных изделий	13
1.2.1. Стирольные пластики	14
1.2.2. Полиолефины	15
1.2.3. Эфиروцеллюлозные пластики (этролы)	16
1.2.4. Поливинилхлориды (ПВХ, PVC)	17
1.2.5. Полиакрилаты	18
1.2.6. Термостойкие конструкционные пластмассы	18
1.2.7. Вспнивающиеся материалы	19
1.2.8. Наполненные термопласты	20
1.3. Технологические требования к конструкции профильных изделий	20
1.3.1. Технологичность формы	20
1.3.2. Точность размеров	23
Литература	29
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ.	
ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ	31
2.1. Технологические схемы	31
2.1.1. Трубообразные профили	32
2.1.2. Полые и камерные профили	33
2.1.3. Сплошные профили	34
2.1.4. Комбинированные профили	36
2.1.5. Профили с сердечником	36
2.2. Комплектуемое оборудование технологических линий	37
2.2.1. Экструдеры	38
2.2.2. Шнеки	39
2.2.3. Технологическая оснастка	43
2.2.4. Калибровочные столы и охлаждающие устройства	45
2.2.5. Тянущие устройства	46
2.2.6. Режущие устройства	49
2.2.7. Приемные устройства	51
2.2.8. Дополнительные устройства	51
2.3. Производительность технологической линии	52
2.3.1. Выбор экструзионной линии для производства профилей	54
Литература	54
ГЛАВА 3. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЬНЫХ	
ИЗДЕЛИЙ	56
3.1. Эксплуатационные свойства термопластов	56
3.2.1. Термомеханические испытания	60
3.2. Входной контроль сырья	65
3.2.1. Свойства сыпучих материалов	65
3.3. Технологические свойства пластмасс	68
3.3.1. Реологические свойства	70
Литература	76

ГЛАВА 4. ТЕЧЕНИЕ И ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИ ФОРМОВАНИИ

ИЗДЕЛИЙ ИЗ РАСПЛАВА	78
4.1. Введение	78
4.2. Подача расплава в экструзионную головку	80
4.3. Течение в головке и формирование «заготовки»	80
4.4. Деформирование экструдата на выходе из экструзионной головки	82
4.4.1. Разбухание экструдата	82
4.4.2. Неизотермическая вытяжка расплава	86
4.4.3. Основные характеристики деформирования расплава полимера	87
4.4.4. Деформирование при калибровании	98
4.5. Литература	101

ГЛАВА 5. КАЛИБРОВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ 103

5.1. Основные методы калибрования	103
5.2. Конструирование калибрующих устройств	106
5.2.1. Типовые конструкции калибрующих устройств	106
5.2.2. Способы установки и крепления	112
5.3. Охлаждение профильных изделий	113
5.3.1. Водяное охлаждение	114
5.3.2. Воздушное охлаждение	114
5.4. Определение технологических размеров калибраторов	114
5.4.1. Размеры поперечного сечения	114
5.4.2. Охлаждение расплава в калибраторе. Определение времени охлаждения	115
5.5. Технологические проблемы калибрования	126
Литература	129

ГЛАВА 6. ЭКСТРУЗИОННЫЕ ГОЛОВКИ 131

6.1. Типовые конструкции	131
6.2. Рекомендации по конструированию головок	135
6.2.1. Способы крепления головок к цилиндру экструдера	135
6.2.2. Компоновка деталей головки	138
6.2.3. Нагревательные элементы и датчики температуры и давления	146
6.2.4. Изготовление и ремонт деталей экструзионных головок	148
6.3. Расчет экструзионных головок	149
6.3.1. Размеры канала фильеры	149
6.3.2. Размеры формирующего канала при экструзии некалибруемых профилей	152
6.3.3. Размеры формирующего инструмента при экструзии с калиброванием	168
6.4. Доводка оснастки	171
6.5. Литература	173

ГЛАВА 7. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ 177

7.1. Поливинилхлорид и композиции на его основе	177
7.1.1. Свойства частиц полимера	178
7.1.2. Стабилизаторы	180
7.1.3. Пластификаторы	181
7.1.4. Смазки	182
7.1.5. Наполнители	183
7.1.6. Красители и пигменты	183
7.1.7. Огнезащитные добавки	184
7.1.8. Приготовление композиций ПВХ	184
7.1.9. Особенности экструзии ПВХ	185
7.2. Свойства и особенности переработки полиолефинов	197
7.2.1. Свойства	197

7.2.2.	Оборудование и оснастка	201
7.2.3.	Особенности переработки	213
7.3.	Стирольные пластики	216
7.3.1.	Ударопрочный полистирол	216
7.3.2.	АБС-пластики	216
7.4.	Полиакрилаты	222
7.4.1.	Свойства	223
7.5.	Полиамиды	229
7.5.1.	Свойства полиамидов	230
7.5.2.	Экструзия полиамидов	234
7.6.	Экструзия поликарбоната	238
7.6.1.	Свойства поликарбоната	238
7.6.2.	Оборудование и оснастка	238
7.6.3.	Особенности переработки	243
7.7.	Полиацетали	247
7.7.1.	Физико-механические свойства	247
7.7.2.	Оборудование и оснастка	249
7.8.	Эфиrhoцеллюлозные пластики (этролы)	252
7.8.1.	Получение и модифицирование	252
7.8.2.	Свойства и области применения	254
7.8.3.	Особенности переработки	255
7.8.4.	Техника безопасности	261
7.8.5.	Последующая обработка изделий из этролов	261
7.9.	Пеноматериалы	261
7.9.1.	Применение	262
7.9.2.	Пенополивинилхлорид	263
7.9.3.	Пенополиэтилен	267
7.9.4.	Пенополистирол	271
7.9.5.	Другие пенопласты	272
7.10.	Свойства и переработка наполненных полимеров	273
7.10.1.	Достижения	274
7.10.2.	Оборудование	276
7.11.	Термопласты	279
7.11.1.	Виды и свойства ТЭП	280
7.11.2.	Применение	284
7.11.3.	Экструзия термопластов	286
7.11.4.	Термопластичный полиуретан (ТПУ)	287
7.12.	Проблемы при экструзии профильных изделий	290
7.13.	Техника безопасности при переработке различных термопластов	301
	Литература	307

ГЛАВА 8. ЭКСТРУЗИЯ ПРОФИЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 314

8.1.	Экструзия «массивных» профилей, стержней, плит	314
8.1.1.	Введение	314
8.1.2.	Применение «массивных» профилей	315
8.1.3.	Технология получения массивных профилей	316
8.1.4.	Качественная модель процесса формования стержней	318
8.2.	Производство профилей из пено-ПВХ	324
8.2.1.	Методы производства вспененных профилей	325
8.2.3.	Оборудование для производства вспененных труб и профилей	326
8.2.4.	Калибрующие устройства	330
8.3.	Комбинированные профили	331
8.3.1.	Производство многоцветных изделий и профилей из различных полимеров	331
8.3.2.	Дублированные и армированные профили	338

8.4. Экструзия рельефных профилей	345
8.4.1. Оконные профили, дверные панели, подоконники	348
8.4.2. Пластмассовые панели	374
8.4.3. Профилированный лист	380
8.4.4. Сайдинг	393
8.4.5. Кабель-каналы	405
8.5. Многоручьевая экструзия	413
8.5.1. Расположение профиля при двухручьевой экструзии	414
8.5.2. Калибрующие устройства для одно- и двухручьевой экструзии	417
8.5.3. Оборудование для многоручьевой экструзии	419
Литература	421
ГЛАВА 9. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	426
9.1. Внешний вид. Размеры	426
9.1.1. Общие требования к внешнему виду профильных изделий	427
9.1.2. Размерный контроль профильных изделий	427
9.2. Кратковременные механические испытания	431
9.3. Испытания, связанные с наличием остаточных технологических напряжений	439
9.3.1. Определение усадки при прогреве	439
9.3.2. Испытания на растрескивание	440
9.4. Оценка долговечности изделий	440
9.5. Испытания горючести материалов	443
Литература	445
ГЛАВА 10. МЕТОДЫ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТМАССОВЫХ ПРОФИЛЕЙ	446
10.1. Механическая обработка	446
10.2. Способы соединения изделий из пластмасс	448
10.2.1. Замковые соединения	448
10.2.2. Соединение гвоздями, шурупами	450
10.2.3. Соединение сваркой	450
10.2.4. Склеивание	451
10.3. Поверхностная обработка профильных изделий (декорирование)	453
10.3.1. Окрашивание в массе	453
10.3.2. Ламинирование профилей	454
10.3.3. Нанесение печати	454
Литература	454
Приложение 1. Содержание типового технологического регламента (2002 г.)	455
Приложение 2. Некоторые стандарты и технические условия на экструдированные профили из термопластов и ТЭП	456
Приложение 3. Основные отечественные производители материалов для изготовления профильных изделий	458
Приложение 4. Зарубежные производители экструзионных линий и оснастки для производства профильных изделий	460
Приложение 5. Производители системных ПВХ-профилей в России	462
Приложение 6. Производственные мощности изготовителей оконных профилей	463
Приложение 7. Прикладное программное обеспечение для моделирования процессов переработки пластмасс	464
Приложение 8. Методы испытаний пластмасс. Группа Л29	466
Приложение 9. Некоторые полезные ссылки в Интернете	468
Приложение 10. Краткий обзор оконных систем различных производителей	471
Предметный указатель	477

Предисловие

Профильно-погонажные пластмассовые изделия сложного поперечного сечения находят широкое применение в строительстве, различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в быту. Номенклатура этих изделий практически не ограничена, но объемы производства большинства из них обычно невелики. Специализированные предприятия заинтересованы в изготовлении больших объемов продукции, поэтому мелкие серии изделий стали осваивать небольшие фирмы, количество которых за последние 10–15 лет значительно выросло.

В области экструзии профильных изделий с середины 90-х годов создалась ситуация, практически сходная с той, которая сложилась в середине 70-х гг. XX в. с литьем под давлением, когда многие предприятия различной ведомственной подчиненности с самым различным профилем продукции начали приобретать для собственных нужд отдельные литьевые машины, а затем и организовывать самостоятельные литьевые участки и даже цехи с полным собственным инструментальным и технологическим обеспечением.

В подобной ситуации интенсивно растет число инженерно-технических работников, привлекаемых к производству профильных изделий, как правило, не имеющих соответствующей квалификации. Эта тенденция хорошо прослеживается по динамике роста числа и изменению характера консультаций по вопросам экструзии профилей. Практически всем им была бы полезной книга, в которой достаточно полно и систематически был бы изложен весь комплекс инженерно-технических задач, которые приходится решать при подготовке и освоении производства профильных изделий из термопластов.

Эта книга может представлять интерес также и для специалистов по производству профилей и других родственных изделий (труб, листов, кабельной изоляции и пр.), поскольку в ней рассматриваются многие достижения в области теории и практики их производства за последние годы. Большая часть материалов, собранных в данной книге, оказывается практически недоступной для многих специалистов, занятых обеспечением производства на специализированных заводах и предприятиях мелкого и среднего бизнеса.

На сегодняшний день известен лишь один ведомственный документ, в котором рассматривается весь комплекс вопросов, связанных с производством профильных изделий, начиная от конструкции профиля до его эксплуатации. Это «Руководящие технические материалы по расчету и конструированию технологической оснастки для производства профильных изделий из термопластов» и «Рекомендации по технологии экструзии профильных изделий из термопластов», разработанные автором предлагаемой книги и изданные ограниченным тиражом в 1983 г. НПО «Пластик» (Москва). Этот документ помог многим инженерам, занимающимся производством профильных изделий и его техническим обеспечением, глубже осмыслить эту непростую сферу деятельности и разрешить проблемы, которые раньше не освещались.

Богатый теоретический и практический опыт обработки металлов давлением и деформирования других пластичных материалов мало используется переработчика-

ми пластмасс, хотя деформирование и тех и других имеют много общего, различаясь во многих случаях скорее количественно, чем качественно. Шнековая экструзия получила свое начало от плунжерной экструзии пластичных заготовок (в 50-х гг. она называлась штрангпрессованием). Изменение рабочего механизма для непрерывного выдавливания материала потребовало изменения и его агрегатного состояния. Теперь шнековая экструзия — это непрерывный процесс формования изделий из расплава. Перевод твердого материала в расплавленное состояние и обработка его как вязкой жидкости позволяет получать на однотипном оборудовании (шнековых экструдерах) изделия любой формы путем изменения формирующей оснастки и комплектующего оборудования технологических линий. Плунжерная экструзия и в настоящее время применяется для материалов, переработка которых требует более высоких давлений, чем могут развивать шнековые экструдеры (например, некоторые виды фторопластов, высокомолекулярный полиэтилен), или для получения изделий со специфическими свойствами (повышенная прочность, твердость и долговечность при переработке некоторых пластмасс в высокоэластическом состоянии).

В настоящей книге автор в некоторой степени пытается восполнить этот пробел. Известно, что при формовании изделий из расплава материал многократно в непрерывном процессе изменяет агрегатное и физическое состояние: от твердого исходного сырья до расплава в шнеке и в головке экструдера, пластичной заготовки и твердого конечного продукта. Такие явления, как разбухание и вытяжка экструдата, искажение его формы, ориентация расплава и возникновение остаточных релаксируемых во времени напряжений усложняют процессы формования изделий сложной формы и приемлемого качества, и ориентация на богатый мировой опыт в этой области позволяет значительно уменьшить собственные трудности.

Современный рынок выдвигает все более жесткие требования к предприятиям, в связи с чем не последнее место в успехе деятельности предприятия занимает эффективная организация работы. Возросшая конкуренция требует производить все более технически совершенные продукты, не увеличивая при этом их стоимость. Технологии с каждым днем усложняются, требуя от сотрудников все более высокой квалификации. Необходимым условием выхода на мировой рынок стали управление качеством и рисками, а также сертификация предприятия по ISO9000.

Автор предполагал построить изложение таким образом, чтобы теоретические аспекты переработки были непосредственно увязаны с практическими рекомендациями и реальными примерами их использования. В соответствии с направленностью своей основной деятельности автор более 40 лет систематически занимается указанным выше комплексом вопросов, участвуя как в непосредственном их решении в условиях производства, так и в подготовке инженеров соответствующей специальности, и обладает достаточным количеством информации для подготовки книги, являясь к тому же автором ряда ее источников.

Книга состоит из 10 глав и Приложений.

В главе 1 рассмотрены назначение, области применения и классификация профильных изделий. Приводятся рекомендации по конструированию технологичных профильных изделий, кратко рассматриваются свойства основных видов термопластов, на которые прежде всего следует обращать внимание при выборе материала для производства профильных изделий.

В главе 2 рассмотрены шесть основных схем производства профильных изделий в соответствии с их классификацией по технологическим признакам (трубообразные, пустотелые, камерные, сплошные, комбинированные и профили с сердечником) и особенности компоновки оборудования в линии по каждой схеме, а также требования к узлам установки с учетом формы и размеров экструдированного профиля. Даны сведения по производительности экструзионных линий в зависимости от типа и материала профиля.

В главе 3 кратко рассмотрены основные свойства термопластов, представляющие наибольшую важность с точки зрения переработки на экструзионном оборудовании и последующей эксплуатации изделий: реологические свойства материалов и методы входного контроля сырья, прочность и деформативность при различных видах нагружения, теплофизические характеристики, предельные температуры эксплуатации. Приводятся также некоторые технологические характеристики материалов и методы их оценки в целях подбора оптимального технологического режима переработки при изготовлении профильного изделия заданных форм и размеров.

В главе 4 рассматриваются основные вопросы формования профильных изделий из расплавов полимеров: образование гомогенного расплава и его подача шнеком в экструзионную головку, течение расплава по каналам сложной геометрии и формирование экструзионной заготовки, пластическое деформирование заготовки на выходе из головки с одновременным охлаждением и получением изделия требуемой формы и размеров. Кроме того, излагаются теоретические вопросы течения и деформирования вязкоупругих жидкостей применительно к их практическому использованию при конструировании технологической оснастки и отработке технологического процесса получения изделия.

Глава 5 посвящена принципам конструктивного оформления и области предпочтительного использования существующих способов калибрования и охлаждения профильных изделий. Приведены методы расчета технологических размеров калибрующих устройств (длины и поперечного сечения), а также рекомендации по конструированию калибрующих и охлаждающих устройств и их компоновке в составе технологической линии. Рассмотрено также влияние режимов калибрования и охлаждения на качество изделий.

Значительное место в общем объеме книги занимает глава 6, в которой приводится классификация экструзионных головок в зависимости от формы, размеров и материала профиля. Даны рекомендации по конструированию головок, включающие привязку к экструдеру, компоновку деталей, установку нагревательных элементов и датчиков температуры, выбор материалов для деталей головки и способов их обработки.

Особое внимание уделяется расчету экструзионных головок и, в первую очередь, расчету размеров формирующих каналов на основе анализа процесса деформирования вязкоупругих жидкостей с учетом разбухания и вытяжки экструдата на выходе из головки. Показана взаимосвязь размеров формирующих каналов с конструкцией калибрующего устройства. Значительное внимание уделяется применению прикладных компьютерных программ для расчета и конструирования экструзионных головок.

Важное значение для технологов может иметь глава 7, где изложены специфические требования к оборудованию и оснастке, а также рекомендации по выбору техно-

Важное значение для технологов может иметь глава 7, где изложены специфические требования к оборудованию и оснастке, а также рекомендации по выбору технологических режимов переработки различных термопластов для производства профилей. Приведены типичные дефекты профильных изделий, основные причины их возникновения и способы устранения. Даны сведения о вредных веществах, выделяющихся при переработке различных материалов, их предельно допустимые концентрации и меры защиты.

В главе 8 рассмотрены свойства, применение, оборудование, оснастка, требования к материалам, основные технологические проблемы при производстве относительно новых и широко используемых в настоящее время изделий (облицовочные панели, оконные профили, подоконники, дверные панели, профилированные листы, сайдинги, кабель-каналы, различного рода уплотнители, комбинированные профильные изделия, состоящие из разнородных, вспенивающихся, высоконаполненных материалов). Описана технология получения массивных профилей, плит, стержней, рельефных изделий, а также особенности многоручьевого экструзии.

В главе 9 описаны основные характеристики качества профильных изделий, приемы, методы их определения и условия проведения испытаний. Значительное внимание уделяется прогнозированию долговечности изделий вследствие старения при действии неблагоприятных факторов, а также классификации и определении горючих свойств пластмасс.

Заключительная глава 10 посвящена рассмотрению методов механической обработки профилей как полуфабрикатов для изготовления конструкций (сверление, фрезерование и пр.), способы соединения с другими деталями (сварка, клейка, механическое соединение и т. д.), а также способы обработки поверхностной (декорирование, тиснение, лакирование, печать) для улучшения внешнего вида и повышения долговечности.

В Приложениях приведен перечень основной нормативно-технической документации (НТД) на изготовление профильных изделий, указаны отечественные и зарубежные стандарты на некоторые виды материалов и профильных изделий, а также методы оценки их качества, представлены сведения об отечественных производителях оконных профилей, зарубежных фирмах-изготовителях линий для производства профильных изделий, начальные сведения о современных способах компьютерного моделирования и изготовления оснастки, некоторые полезные адреса в Интернете.

Автор допускает, что отдельные разделы изложены схематично и недостаточно подробно, а некоторые проблемы вообще не нашли отражения в книге или имеют дискуссионный характер, и с благодарностью примет и рассмотрит любые замечания по улучшению структуры книги и изложению материала. Замечания и предложения просьба направлять по адресу:

ГЛАВА 1. ЭКСТРУЗИОННЫЕ ПРОФИЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

1.1. Назначение, области применения и классификация профильных изделий

Общепринятой классификации профильных изделий не существует. В металлургической промышленности, например, производят профили из черных и цветных металлов; первые изготавливаются в основном прокаткой, вторые — прессованием на горизонтальных прессах. Технология производства пластмассовых профилей во многом аналогична прессованию; не случайно шнековые экструдеры до сих пор часто называют червячными прессами. Различия в технологии обусловлены спецификой свойств пластмасс и металлов и особенностями формования изделий из их расплава и твердого состояния.

Некоторые изделия из пластмасс можно также получать путем пластического деформирования заготовок, находящихся в твердом состоянии. Этот метод для пластмасс не получил промышленного распространения из-за невысокой производительности и ограниченного числа полимеров, которые пригодны для переработки в твердом состоянии. Более подробно плунжерное прессование некоторых видов полимеров рассмотрено в главе 8.

Профили образуют отдельный класс экструзионных погонажных изделий, имеющих, как правило, сложное поперечное сечение. По назначению профильные изделия можно разделить на следующие виды:

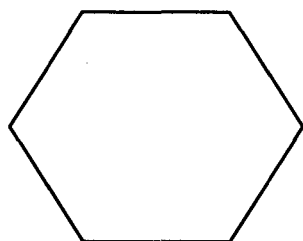
- декоративно-отделочные — профили из различных термопластов, в том числе комбинированные, многоцветные, профили из вспененных материалов, которые при эксплуатации не несут значительных нагрузок, а предназначены для окантовки, облицовки, заделки щелей, придания машинам и конструкциям эстетичного внешнего вида и т. д.;
- конструкционные — профильные изделия, воспринимающие при работе значительные нагрузки и составляющие элементы конструкций целевого назначения, например, рамы оконных переплетов, дверные панели и элементы дверных рам, ручки чемоданов или аппаратуры, уплотнительные профили из ПВХ или термоэластопластов и т. д.;

- специального назначения — изделия, которые не относятся к первым двум типам и имеют вставки из других материалов, необходимых для выполнения изделием заданных функций — например, коллекторную гребенку электродвигателя из жесткого ПВХ с запрессованными в нее токонесущими медными шинами относят к профилям специального назначения. К этому типу профилей не относятся армированные изделия, содержащие вставки для усиления профиля (металл, дерево, текстиль и пр.).

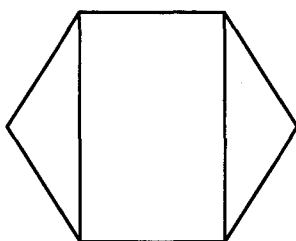
Деление профильных изделий по назначению в значительной мере условно, поскольку одно и то же изделие может выполнять различные функции.

Непосредственное влияние на выбор технологической схемы производства и конструкцию технологической оснастки оказывают форма и размеры поперечного сечения профиля. В зависимости от геометрии и технологии изготовления профильные изделия разделяют на ряд групп или типов (рис. 1.1):

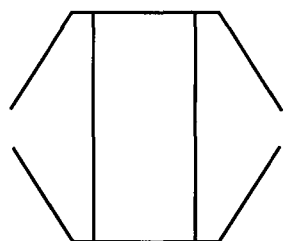
- *трубообразные* (тип 1) — имеют одинаковую толщину стенок и скругленные углы;
- *пустотелые* (тип 2) — имеют закрытые полости; возможны конструкции с различной толщиной стенок, с перемычками и резкими переходами толщины стенок в углах;



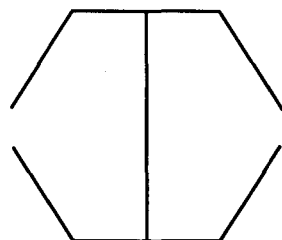
Трубообразный
профиль



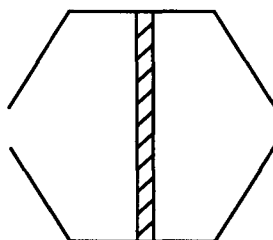
Пустотелый или полый
профиль



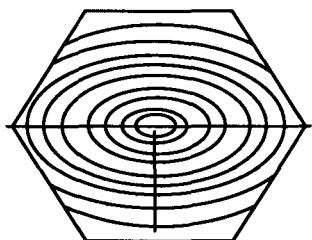
Камерный
профиль



Сплошной
профиль



Комбинированное
изделие



Профиль
с сердечником

Рис. 1.1. Классификация пластмассовых профильных изделий [1]

- *камерные* (тип 3) — аналогичны по конструкции пустотелым профилям, но отличаются от них разрывом наружной оболочки; возможна различная толщина стенок;
- *сплошные* (тип 4) — характеризуются отсутствием замкнутых полостей и разнообразием форм и размеров;
- *комбинированные* (тип 5) — могут быть любыми из указанных выше типов с включением участков другого цвета, другого материала или того и другого вместе;
- *профили с сердечником* (тип 6) — комбинированные профили, армированные сердечником из инородного полимерного материала, стали, дерева, текстиля и т. д.

В данную классификацию включены только те комбинированные изделия, которые изготавливаются в одном непрерывном технологическом процессе [1, 2].

Профильные изделия разделяют также по некоторым особенностям геометрии поперечного сечения:

- по соотношению толщины стенок на различных участках сечения профиля — равно- и разнотолщинные;
- по симметрии — с одной осью симметрии, с двумя осями симметрии, осесимметричные (стержни, трубы) и несимметричные;
- по относительной толщине стенок — тонкостенные ($h/b < 0,1$); нормальные ($h/b = 0,1-0,5$) и толстостенные ($h/b > 0,5$), где h и b толщина и ширина стенки профиля.

Прессованные профили из алюминиевых и магниевых сплавов в основном делятся по геометрическим признакам. Так, в [3] их разделяют на полые профили (одноканальные и многоканальные), профили переменного сечения, панели, прямоугольные и полосовые профили, уголковые, таврового и двутаврового сечений, швеллерообразные, зетобразные и произвольного сечения, косоугольные, профили радиусные, дуговые и бульбообразные. Внутри каждой из этих групп имеется более детальное деление в зависимости от особенностей формы и размеров.

При сравнении классификаций пластмассовых и металлических профилей можно отметить много общих черт, но классификация пластмассовых профильных изделий представляется более четкой и обоснованной.

1.2. Материалы для производства профильных изделий

Профильные изделия можно изготавливать из любых термопластов, но чаще всего их производят из жесткого и мягкого поливинилхлорида, ударопрочного полистирола, АБС-пластика, жесткого и мягкого полиэтилена, полипропилена, полиметилметакрилата, поликарбоната, эфирцеллюлозных пластиков и термоэластопластов [4–8].

Далее приведены общие свойства пластмасс, применяемых для изготовления профильных изделий, которые могут быть использованы при выборе материала.

1.2.1. Стирольные пластики

1.2.1.1. Акрилнитрилбутадиенстирол (АБС, ABS)

Среди жестких пластмасс он обладает наиболее предпочтительным комплексом свойств — высокой жесткостью; хорошей прочностью на удар, особенно при низких температурах; стоек к слабым кислотам и щелочам; растворяется в органических растворителях, особенно в хлорированных углеводородах; имеет высокие диэлектрические показатели. Материал непрозрачен, хорошо окрашивается. Для экструзии применяются высоковязкие экструзионные марки плотностью 1,02–1,06 г/см³, твердостью по Роквеллу R75–85 (ASTM D785), прочностью при растяжении 28–48 МПа, относительным удлинением при разрыве 20–110%, модулем эластичности при растяжении 1586–2620 МПа, при изгибе 1379–3310 МПа, прочностью на сжатие при 20 °С 133–534 Дж/м (ASTM D256). Материал чувствителен к надрезу, царапинам.

Относится к сравнительно термостабильным материалам, но гигроскопичен и требует подсушки перед переработкой. При производстве профилей для наружного применения следует использовать стабилизированные композиции.

Диапазон температур применения — от –40 до +80 °С, кратковременно — до +95 °С. Применяется для производства изделий повышенной прочности и жесткости с матовой или глянцевой поверхностью. Неокрашенные марки могут применяться для производства изделий, соприкасающихся с пищевыми продуктами. Изделия могут соединяться склеиванием клеями на основе органических растворителей (циклогексанона, тетрагидрофурана, метиленхлорида и др.). Цена за 1 кг — 1,5–1,8\$. (Более подробно свойства, применение и переработка АБС-пластиков рассмотрены в главе 7.)

1.2.1.2. Ударопрочный полистирол (УПС, HIPS, High-Impact Polystyrene)

Сравнительно недорогой жесткий материал, хорошо перерабатывается методом экструзии. Обычно непрозрачный, окрашиваемость хорошая. Поверхность изделий матовая. Материал устойчив к действию растворов солей, минеральные и растительные масла оказывают на него слабое воздействие; под воздействием бензина, керосина, кетонов, высших спиртов, этилового спирта, эфирных масел и особенно при воздействии окислителей происходит ухудшение свойств. Растворяется в хлорированных углеводородах, ацетоне, циклогексаноне и др.

Применяется для производства недорогих жестких изделий, к которым не предъявляется таких высоких требований, как к профилям из АБС. Изделия могут соединяться склеиванием такими же клеями, как и для АБС. (Более подробно о свойствах и переработке УПС см. в главе 7.)

1.2.1.3. Полистирол общего назначения (ПС, PS, General PS)

Прозрачный, хорошо окрашиваемый, легко перерабатываемый материал. Имеет высокий глянец поверхности изделий и высокие диэлектрические показатели.

Из-за повышенной хрупкости для производства профильных изделий применяется редко, в основном для светопрозрачных изделий небольших размеров или для изделий с хорошими диэлектрическими свойствами.

1.2.2. Полиолефины

1.2.2.1. Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП, LDPE)

Эластичный материал с хорошими диэлектрическими свойствами и низким водопоглощением. В тонком слое изделия из базовых неокрашенных марок полупрозрачны. Мягкий полиэтилен имеет высокую морозостойкость (до -70°C). Механические показатели значительно снижаются с увеличением температуры. Склонен к ползучести и к образованию усталостных трещин под влиянием поверхностно-активных веществ.

Диапазон температур применения под нагрузкой от -40 до $+50^{\circ}\text{C}$. Многие марки ПЭНП пригодны для соприкосновения с пищевыми продуктами. Пригоден для производства относительно несложных изделий, работающих при низких температурах.

Перерабатываемость удовлетворительная, может перерабатываться в широком диапазоне температур, наиболее типичная температура расплава — $130\text{--}160^{\circ}\text{C}$. Расплав допускает повышенные вытяжки, прочность расплава высокая, особенно при повышенных температурах. При охлаждении расплав остывает сравнительно медленно. (Подробнее о свойствах и переработке ПЭНП см. в главе 7.)

1.2.2.2. Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП, HDPE)

Недорогой непрозрачный или полупрозрачный материал средней жесткости. Относится к кристаллизующимся полимерам. Модуль упругости (высокоэластичности) при растяжении $700\text{--}1200$ МПа. Обладает высокой химической стойкостью к большинству минеральных и органических веществ. Имеет высокий коэффициент линейного расширения, что необходимо учитывать при эксплуатации.

Диапазон температур применения под нагрузкой от -20 до $+60^{\circ}\text{C}$. Соединение изделий — сваркой.

При переработке обладает высокой упругостью расплава, что вызывает повышенное разбухание экструдата и искажение формы. Вследствие этого затруднено получение изделий строгой формы и размеров. Расплав охлаждается быстро, при неравномерном охлаждении возникает коробление и другие искажения формы изделия. Имеет повышенную термическую усадку при формовании.

Применяется для производства относительно несложных изделий. (Более подробные сведения о материале и его переработке см. в главе 7.)

1.2.2.3. Полипропилен (ПП, PP)

Кристаллизующийся полимер с высокой степенью кристалличности. Имеет наименьшую из полиолефинов плотность. Полупрозрачный, хорошо окрашиваемый материал. Обладает высокой химической стойкостью и хорошими антифрикционными свойствами. Имеет высокую стойкость к усталостным трещинам. Обладает повышенными жесткостью и твердостью, модуль упругости при растяжении $1100\text{--}1200$ МПа. Базовые марки имеют низкую морозостойкость. Ударопрочные марки (с добавками каучука) могут применяться для изготовления изделий, работающих при отрицательных температурах.

Изделия, как правило, имеют светло-серый цвет. Диапазон температур применения под нагрузкой от -5 до $+100$ °С. Применяется для производства изделий, требующих высокой тепловой, химической стойкости и долговечности.

Перерабатывается аналогично ПЭВП, перерабатываемость хорошая. (Более подробно см. в главе 7.)

1.2.2.4. Сополимер этилена с винилацетатом (ЭВА)

Полупрозрачный высокоэластичный материал с хорошей окрашиваемостью. Поверхность изделий матовая или слегка глянцевая. С увеличением содержания винилацетата значительно уменьшаются степень кристалличности, жесткость и прочность. Сополимеры с содержанием винилацетата в пределах 10–12 мол. % по свойствам близки к ПЭНП; при содержании винилацетата 13–25 мол. % сополимеры каучукоподобны. Отечественные марки называются сэвиленом.

Иногда применяется вместо пластифицированного ПВХ при работе в области низких температур или если имеется опасность миграции пластификатора.

Перерабатываемость хорошая. Температура плавления и переработки ниже, чем у ПНП. (Подробности см. в разделе 7.2 главы 7.)

1.2.3. Эфиrhoцеллюлозные пластики (этролы)

1.2.3.1. Ацетат целлюлозы (АЦ)

Материал средней или высокой жесткости. Обладает хорошей химической стойкостью и низким уровнем запаха. Прозрачен или полупрозрачен, хорошо окрашивается, изделия имеют высокий глянец поверхности. Относится к горючим материалам. Изделия склонны к старению под воздействием тепла или УФ-лучей. В настоящее время применяется мало из-за проблем с сырьем и дорогостоящих пластификаторов для производства материалов.

Из АЦ можно изготавливать весьма тонкостенные профили. В 60–70 гг. XX в. широко применялся в мебельной промышленности (кромки для столов, декоративные накладки, ползки для книжных шкафов и т. д.).

Перерабатываемость хорошая. Требуется подсушки перед переработкой.

1.2.3.2. Ацетобутират целлюлозы (АБЦ, САВ)

Обладает высокой стойкостью к влиянию климатических факторов, УФ-лучей. Имеет широкий диапазон жесткости, несколько более жесткий, чем ацетат целлюлозы. Без окраски прозрачен, хорошо окрашивается. Изделия имеют высокий поверхностный глянец. Основной недостаток — неприятный запах, который устраняется введением в композицию специальных веществ для устранения запаха.

В 80-е гг. широко применялся в автомобильной промышленности для изготовления отделочных профилей с алюминиевой фольгой или металлизированной ПЭТФ-пленкой (молдинги, водосточные желоба и др.).

Перерабатываемость хорошая, требует подсушки.

1.2.3.3. Этилцеллюлоза (ЭЦ)

Наиболее жесткий и легкий из эфиrhoцеллюлозных материалов. Обладает высокой погодостойкостью. Прозрачный материал янтарного цвета. Изделия имеют высокий

поверхностный глянец. Применяется для производства декоративных изделий в мебельной, автомобильной промышленности и в строительстве. В настоящее время применяется редко из-за повышенной горючести и проблем с сырьем.

Перерабатываемость хорошая. (Более подробно этролы рассмотрены в главе 7.)

1.2.4. Поливинилхлориды (ПВХ, PVC)

1.2.4.1. Жесткий ПВХ (НПВХ, UPVC, Rigid PVC, RPVC)

Один из лучших материалов для производства сложных профилей. Обладает хорошей погодостойкостью, умеренной прочностью, относится к самогасящимся материалам. Наиболее дешев из конструкционных пластмасс с аналогичными характеристиками. Непрозрачный, окрашиваемость удовлетворительная и зависит от состава композиции. Поверхность изделий матовая или глянцевая. Имеет высокую длительную прочность, повышенный модуль упругости (до 3000–3500 МПа) при нормальной температуре, устойчив по отношению к органическим и неорганическим кислотам, щелочам, окислителям, алифатическим углеводородам. Растворим в хлорированных углеводородах. При низких температурах хрупок, прочность на удар невысока. Введение в композиции ударопрочных добавок и светостабилизаторов позволяют использовать изделия в условиях воздействия атмосферных факторов, УФ-излучения и низких температур.

Имеются прозрачные композиции, пригодные для производства прозрачных панелей, листов, труб и профилей. Светопрозрачность — до 70–75%.

Трудногорючий пластик, горение не поддерживает.

Диапазон температур применения под нагрузкой от -5 до $+60$ °С. Применяется в строительстве, электротехнической промышленности, машиностроении для производства самых разнообразных сложных профилей (оконные профили, сайдинги, облицовочные панели, кабель-каналы и т. д.).

Широко используется для производства комбинированных изделий методом соэкструзии вместе с пластифицированным ПВХ.

Перерабатываемость хорошая. Материал нетермостабилен даже при наличии высокоэффективных термостабилизаторов, поэтому надолго оставлять материал при высокой температуре нельзя.

1.2.4.2. ПВХ-пластикат (ПВХпл., МПВХ, Flexible PVC, FPVC)

Один из самых распространенных материалов для экструзии профильных изделий.

Композиции содержат кроме других добавок пластификаторы. В зависимости от состава композиции и содержания пластификатора механические свойства изменяются в широком диапазоне — от очень гибких до полужестких материалов. Хорошо окрашивается, цвет зависит от состава смеси и типа красителя. Специальные композиции могут быть прозрачными (для изготовления изделий медицинского и технического назначения). Поверхность изделий матовая или с высоким глянцем.

Трудногорючий пластик. Перерабатываемость хорошая. Расплавы пластиков имеют высокую вязкость и формоустойчивость, высокий коэффициент трения расплава о металл, поэтому калибрование экструдата для большинства композиций не применяется.

Применяется для производства отделочных, декоративных уплотнительных профилей различного поперечного сечения. Широко используется в сочетании с жестким ПВХ в соэкструзионных изделиях. (Более подробно о свойствах, переработке и применении поливинилхлоридов см. в главе 7.)

1.2.5. Полиакрилаты

1.2.5.1. Полиметилметакрилат (ПММА, РММА)

Жесткий, прозрачный, один из самых атмосферостойких материалов. Жесткость и прочность выше, чем у эфироцеллюлозных пластмасс. Ударопрочные и замутненные полиакрилаты непрозрачны. Горючий, горит с выделением характерного запаха. Очень хорошо окрашивается. Изделия имеют высокий поверхностный глянец. Оптическая прозрачность при экструзии трудно достижима из-за высокой адгезии расплава к металлу калибрующего устройства.

Применяется для производства изделий светотехнического назначения (корпуса светильников). Может применяться для контакта с пищевыми продуктами (например, молокопроводы).

Перерабатываемость хорошая. При переработке склонен к накоплению значительных остаточных напряжений, вызывающих самопроизвольное растрескивание изделий. Калибрование и охлаждение изделий рекомендуется проводить при повышенной температуре (до 70–90 °С). (Более подробно о переработке материала см. в главе 7.)

1.2.6. Термостойкие конструкционные пластмассы

1.2.6.1. Полиацетали (полиоксиметилен, ПОМ; полиформальдегид, ПФА)

Высококристаллический нетермостабильный термопласт. При введении стабилизаторов термостабильность значительно повышается.

Износостойкий прочный пластик. Относительно дорог. Для экструзии чаще всего используют сополимеры типа Хостаформа (ФРГ) или отечественный СТД (сополимер триоксана с диоксаланом). Горюч. Горит спокойным бездымным пламенем.

Перерабатываемость трудная. Имеет высокую температуру переработки и узкий диапазон плавления, чувствителен к неравномерности охлаждения. Для производства профилей применяется редко из-за трудности контроля над процессом производства сложных изделий.

Используется для производства полуфабрикатов для последующей механической обработки: стержней, плит, толстостенных труб.

1.2.6.2. Поликарбонаты (ПК, РС)

Один из лучших конструкционных пластиков, имеет высокую прочность при высоких и низких температурах, высокую теплостойкость, хорошие электроизоляционные свойства, очень высокую прочность на удар, малую усадку при переработке. Прозрачен, легко окрашивается. Изделия имеют высокий поверхностный глянец. Горюч.

Диапазон температур применения под нагрузкой от -30 до $+60$ °С. Может применяться для производства изделий повышенной точности.

Достаточно дорог. В настоящее время 1 кг ПК стоит 3–5\$.

Перерабатываемость хорошая. Гигроскопичен, при переработке требует подсушки. Имеет высокую вязкость расплава, требует применения экструдеров с повышенной мощностью привода. Перерабатывается при температуре до 300 °С, охлаждение экструдата желательно при температуре 70–100 °С. Склонен к образованию остаточных напряжений.

Для дробления технологических отходов требуются специальные мощные и износостойкие ротационные дробилки. (Более подробно о свойствах, переработке и применении изделий из ПК см. главы 7 и 8.)

1.2.6.3. Полиамиды (ПА, РА)

Один из лучших конструкционных материалов. Имеется много видов полиамидов, в том числе и прозрачных. Хорошо окрашивается. Изделия имеют высокий поверхностный глянец. Имеет низкий коэффициент трения, высокую прочность на удар при высоких и низких температурах.

Диапазон температур работы под нагрузкой от -10 до $+50$ °С. Применяется для производства изделий, требующих малого коэффициента трения.

Перерабатываемость хорошая. Для экструзии применяются высоковязкие сорта типа полиамида-11, полиамида-12, сополимеров, термоэластопластов на основе ПА. Материал имеет относительно высокое водопоглощение. При переработке требует подсушки. (Более подробно о переработке экструзионных марок ПА см. в главе 7.)

1.2.6.4. Термопластичный полиуретан (ТПУ), термоэластопласты ТЭП (ЕТР)

ТПУ — полупрозрачный материал янтарного цвета, хорошо окрашивается. Имеет высокую эластичность и износостойкость. Жесткость изменяется в широком диапазоне. Обладает высокой стойкостью к бензину, маслам и озону. Применяется для производства износостойких изделий.

ТЭПы сочетают упругость эластомеров и пластичность пластмасс. Свойства зависят от типа ТЭП и состава композиции.

Перерабатываемость хорошая. Перерабатываются на обычном экструзионном оборудовании без применения калибрования (подобно пластифицированному ПВХ) для мягких сортов ТЭП или с калиброванием — для жестких марок.

Применяются для производства различного рода уплотнителей вместо резины. (Более подробно о свойствах, переработке и применении ТЭП см. в главе 7.)

1.2.7. Вспенивающиеся материалы

Чаще всего применяются при переработке композиции жесткого пено-ПВХ (ПНПВХ). В отличие от невспененного НПВХ они имеют меньшую прочность при разрыве (20–25 МПа) и модуль упругости (1000–1250 МПа), большее относительное удлинение (25–40%). Химическая стойкость и погодостойкость аналогичны жесткому ПВХ. Для производства профильных изделий применяются композиции с использованием химического вспенивателя (порофора). Композиции состоят из полимера

основы (суспензионного или массового ПВХ), вспенивающего агента (обычно азодикарбонамида), модифицирующих добавок, улучшающих технологические и механические свойства материала, стабилизаторов, активаторов, ускоряющих процесс разложения порофора, смазок, наполнителей и красителей.

Применяется для производства декоративно-отделочных профилей (плинтусов, накладок, ковродержателей, стенок мебельных ящиков, панелей и т. д.). Максимальная температура эксплуатации +60 °С. Изделия из пено-НПВХ легко обрабатываются механическими методами (сверление, точение и т. д.). Соединяются склеиванием, с помощью гвоздей, шурупов, скобок.

Перерабатываемость хорошая. Переработка производится на том же оборудовании, что и обычные композиции НПВХ, оснастка имеет некоторые отличия.

Могут применяться также вспенивающиеся композиции на основе других термопластов. (Более подробно см. в главах 7 и 8.)

1.2.8. Наполненные термопласты

Наполненными могут быть любые термопласты. Тип наполнителя и его содержание в смеси зависят от требований к изделию и характеристик используемого оборудования.

Перерабатываемость зависит от типа и содержания наполнителя.

Могут перерабатываться в порошкообразном или гранулированном виде. Влажность наполнителя — не более 8%. Высоконаполненные (до 60–95%) композиции с древесным наполнителем (опилки) могут перерабатываться по специальной технологии из гранулированных или порошкообразных смесей, состав и приготовление которых запатентовано и является предметом ноу-хау фирм.

Могут применяться для производства облицовочных профилей, половых пустотелых досок, стальных панелей, досок для заборов, столешниц и пр. (Более подробно о переработке высоконаполненных композиций см. в главе 8.)

1.3. Технологические требования к конструкции профильных изделий

1.3.1. Технологичность формы

Прежде чем приступить к конструированию технологической оснастки для производства профильного изделия, необходимо критически рассмотреть заданную конструкцию профиля. Далеко не всегда предлагаемое к разработке изделие технологично. Одна лишь форма профиля не дает достаточной информации о том, как следует изготавливать изделие. Нужны также сведения об особенностях эксплуатации изделия, об обоснованности выбора материала, поэтому необходимо согласовывать выдвигаемые заказчиком требования к изделию с проблемами его изготовления и эксплуатации. Принимая во внимание свойства перерабатываемого материала, форму и размеры профиля, производитель должен найти оптимальное решение, являющееся компромиссным между конструкцией изделия, его назначением, свойствами пластмассы и

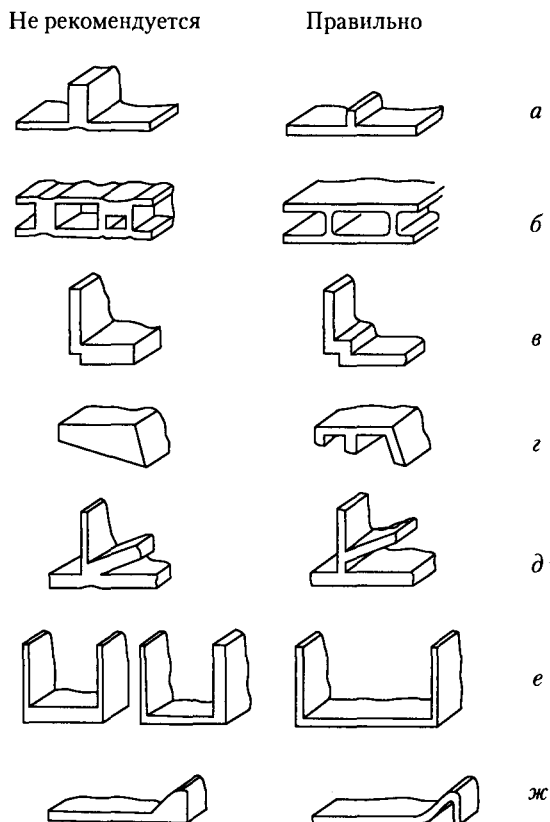


Рис. 1.2. Рекомендации по изменению формы профиля для получения технологичной конструкции [4, 8]

экономическими факторами производства. Именно назначение профильного изделия определяет и выбор материала, и технологию производства.

В отличие от производства профилей из металлов или других пластичных материалов изготовление пластмассовых изделий имеет ряд специфических особенностей. Технологичной конструкции пластмассового профиля следует уделять особое внимание вследствие проявления при переработке полимеров вязкоупругости, низкой теплопроводности, высокого коэффициента термического расширения, ограниченных жесткости и прочности, способности к повышенной ползучести и к накоплению при переработке остаточных напряжений.

Поперечное сечение профиля следует выбирать по возможности простым. На рис. 1.2–1.4 показаны примеры правильной и неправильной [4, 8] конструкций пластмассовых профилей.

Для получения эстетичного внешнего вида изделия желательно применение в конструкции перемычек или ребер, криволинейных поверхностей или тонкостенных участков (рис. 1.2, *a*, *б*, *ж*).



Рис. 1.3. Рекомендации по изменению нетехнологичной формы профиля [4, 8]

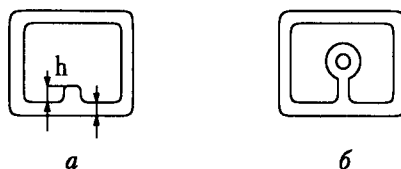


Рис. 1.4. Нетехнологичная (*a*) и рекомендуемая (*б*) форма профиля [4, 8]

По мере возможности следует избегать стыков в изделии, поскольку в этих местах скорости течения отличаются от скоростей на других участках, вследствие чего возникают затруднения с равномерным охлаждением профиля и устранением утяжек или коробления в этих местах (рис. 1.2, *б, в, д, ж*).

Для обеспечения равномерного выхода расплава из формующего инструмента и уменьшения опасности искривления или коробления изделия предпочтение следует отдавать профилям с одинаковой толщиной стенки участков (рис. 1.2, *е*; рис. 1.3).

Полости в изделии не должны располагаться слишком близко друг к другу и не быть малых размеров, иначе возникают трудности с изготовлением формующих деталей (рис. 1.3). Для полостей следует ограничивать количество перегородок. Тол-

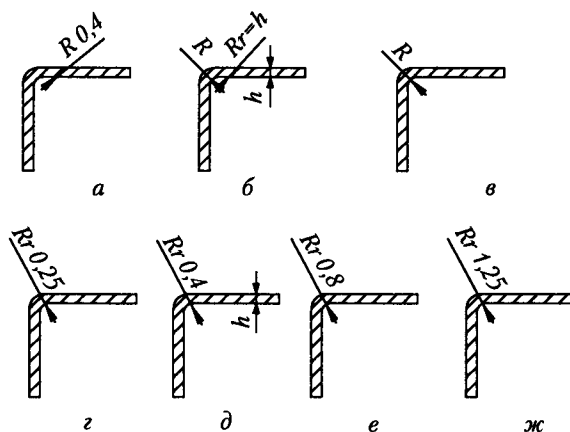


Рис. 1.5. Радиусы скругления в углах пластмассовых профилей [8]

щина стенок перегородок должна быть примерно на 20–30% меньше, чем внешней стенки, иначе могут возникнуть утяжки или коробление профиля вследствие неравномерного охлаждения. Следует, по возможности, избегать полостей внутри полости (рис. 1.4).

Выступы или ребра на наружной поверхности профиля должны быть как можно короче (рис. 1.3, а), поскольку они охлаждаются с обеих сторон. При наличии у профиля длинных ребер возможно неравномерное охлаждение участков и коробление изделия. Кроме того, большие поверхности трения создают проблемы при калибровании. Высота выступов внутри полостей не должна превышать толщину стенки профиля.

Если конструкция изделия предполагает наличие разнотолщинных участков и ребер или выступов, то для обеспечения равномерного охлаждения сечение профиля следует делать, по возможности, симметричным. Равнотолщинное изделие с круговой симметрией гарантировано от коробления.

Следует также избегать резких переходов в местах соединения участков профиля. Для большинства термопластичных материалов с повышенной упругостью расплава скругления в углах образуются самопроизвольно. Наименьший радиус, который может быть получен для угла с наружной стороны, составляет 0,4 мм. Для внутренней стороны минимальный радиус скругления составляет 0,25 мм. Величина радиуса зависит от толщины стенки изделия и свойств экструдированного материала. Рекомендуемые радиусы скругления в углах профиля в зависимости от толщины стенки изделия показаны на рис. 1.5.

1.3.2. Точность размеров

Допуски на размеры являются одним из основных критериев при выборе материала, технологической схемы производства профиля и конструкции технологической оснастки. Завышенные требования к точности увеличивают стоимость изделий.

Таблица 1.1. Рекомендуемые допуски на размеры пластмассовых профилей [5]

Размеры	Материал профиля					
	НПВХ	ПС	АБС	ПП	МПВХ	ПЭ
Толщина стенки, ±%	8	8	8	8	10	10
Величина углы, ± град	2	2	3	3	5	5
<i>Линейный размер, ± мм</i>						
< 3,2	0,18	0,18	0,25	0,25	0,25	0,30
3,2–12,7	0,25	0,30	0,51	0,35	0,35	0,63
12,7–25,4	0,35	0,43	0,63	0,51	0,51	0,76
25,4–38,1	0,51	0,63	0,69	0,69	0,76	0,89
38,1–50,8	0,63	0,76	0,89	0,89	0,89	1,02
50,8–76,2	0,76	0,89	0,94	0,94	1,02	1,14
76,2–102	1,14	1,27	1,27	1,27	1,65	1,65
102–127	1,53	1,65	1,65	1,65	2,36	2,36
127–173	1,91	2,36	2,36	2,36	3,17	3,17
173–254	2,36	3,17	3,17	3,17	3,81	3,81

Таблица 1.2. Допуски на экструдруемые профили из НПВХ [7]

Линейные размеры, мм	Предельные отклонения, ± мм					
	Ряд 1	Ряд 2	Ряд 3	Ряд 4	Ряд 5	Ряд 6
0,1–0,4	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15
0,5–0,9	0,05	0,10	0,10	0,15	0,15	0,20
1–2,9	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20	0,30
3–5,9	0,15	0,20	0,25	0,25	0,30	0,45
6–9,9	0,20	0,25	0,30	0,30	0,40	0,60
10–15,9	0,25	0,30	0,40	0,40	0,50	0,75
16–21,9	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	0,80
22–29,9	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,50
30–49,9	0,50	0,60	0,80	1,20	2,00	3,00
50–80	0,60	0,80	1,20	1,80	3,00	4,50
> 80	0,80	1,20	1,80	2,70	4,00	6,00

Примечание. Допуски ряда 5 определяются в соответствии с ДИН 16941, допуски ряда 6 составляют 1,5 допуска для ряда 5.

Обычно нет необходимости выдерживать с высокой точностью все заданные размеры. Контролю подлежат лишь те, которые необходимы для сборки сопряженных деталей и нормальной эксплуатации детали или узла.

Как правило, допуски пропорциональны размерам профиля. В табл. 1.1 приведена американская система допусков на профильные изделия из различных термопластов, в табл. 1.2 — допуски на изделия из ПВХ фирмы *Reifenhauser*, ФРГ.

В России допуски на размеры и форму профильных изделий регламентируются ГОСТом 19111 «Профильные изделия из поливинилхлорида» и техническими условиями на конкретные изделия, разрабатываемые производителями изделий. С 1999 г. стал действовать ГОСТ 30673-99 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков» [9, 10]. Оба ГОСТа были разработаны применительно к переработке поливинилхлорида и не в полной мере отражают достижения в области технологии экструзии профилей из других термопластов.

При экструзии точность изготовления выше 12 квалитета по ГОСТу применяется редко, так как специфика процесса экструзии не позволяет обеспечивать такую высокую точность, кроме того, с повышением точности особое внимание требуется уделять конструкции оборудования и оснастки, стабильности реологических свойств материала и точности поддержания технологических параметров процесса, что в значительной мере удорожает изделие.

Немецкий общенациональный стандарт DIN 16941 «Экструдированные профили из термопластов» (май 1986 г.) [11] устанавливает две группы допусков: для жестких профилей (группа А) и для эластичных профилей (группа В). Первая группа имеет более жесткие нормы, чем вторая. В этом стандарте приводятся значения допусков на линейные и угловые размеры, допуски на отклонение формы изделия от номинальной и методы контроля отклонений.

1.3.2.1. Допуски на линейные размеры и форму

Допуски на размеры и форму профиля определяются в произвольном сечении по длине изделия. Для комбинированных профилей, состоящих из термопласта и непластифицированного материала, допуски относятся только к пластмассе.

По DIN 16941 определяют допуски на наружные и внутренние размеры, выступы, перегородки, уступы, полости и пр. (табл. 1.3), на толщину стенок профилей (табл. 1.4), на радиусы скругления (табл. 1.5), на угловые размеры профилей (табл. 1.6).

1.3.2.2. Допуски на отклонение формы и положения профиля

Вязкоупругие свойства полимера, неравномерность выхода расплава из головки, неравномерность охлаждения профиля, зависимость термической усадки от степени ориентации и кристалличности материала могут вызывать отклонение формы от номинальной и искажение профиля по длине (отклонение от прямолинейности, скручивание, изгиб в поперечном направлении, неплоскостность граней, отклонение на длину отрезков жестких профилей при их резке и при хранении вследствие медленно протекающих процессов перестройки структуры материала и пр.).

Предельное отклонение от прямолинейности определяют как расстояние между концом или серединой контролируемого объекта и опорной плитой, на которую помещен профиль заданной длины. Отклонения можно контролировать с помощью шаблонов, вставляемых между профилем и плитой в месте измерения отклонения.

По международному стандарту ISO 1101 отклонение от прямолинейности оценивают для обеих кромок профиля по ширине независимо друг от друга. Если отклоне-

Таблица 1.3. Предельные отклонения на линейные размеры, ± мм

Ряды допусков	Диапазон номинальных размеров											
	< 3	3–6	6–10	10–18	18–30	30–50	50–80	80–120	120–180	180–250	250–320	> 320
2А, 2В	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	0,8
3А, 3В	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	1,9	2,8	3,5	3,5	1,4
4А, 4В	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,3	2,9	3,6	4,5	5,6	2,0

Таблица 1.4. Предельные отклонения на толщину стенок профилей, ± мм

Ряды допусков	Диапазон номинальных размеров, мм					
	< 1,2	1,2–2,5	2,5–4,0	4,0–6,5	6,6–10	> 10
2А, 2В	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	8,0%
4А, 4В	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	10,0%

Таблица 1.5. Предельные отклонения для радиусов скругления и высоты фаски, \pm %

Ряды допусков	Диапазон номинальных размеров, мм						
	< 3	3–6	6–10	10–18	18–30	30–50	> 50
2А, 3А, 4А	0,5	20	18	15	15	12	10
2В, 3В, 4В	0,5	20	18	15	15	12	10

Таблица 1.6. Предельные отклонения для угловых размеров, \pm градусов

Ряды допусков	Диапазон номинальных размеров, мм									
	< 1	1–3	3–6	6–10	10–18	18–30	30–50	50–80	80–120	> 120
2А	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,5
3А	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,5	3,5
4А	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,5	3,5	5,0

Таблица 1.7. Предельные отклонения от прямолинейности, $\pm\%$

Ряды допусков	Диапазон номинальных размеров, мм					
	< 18	18–30	30–50	50–80	80–120	> 120
2A	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	0,8
3A	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1
4A	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8

ние допускается оценивать только для одной кромки, то это оговаривается в документации на изделие. Предельные отклонения от прямолинейности в процентах от номинального измеряемого линейного размера приведены в табл. 1.7.

Этим стандартом не регламентируются отклонения от прямолинейности, связанные с неравномерным охлаждением, поскольку весьма сложно обеспечить отсутствие или минимальную величину остаточных напряжений, приводящих к продольному искажению изделия. При необходимости обеспечить минимальные отклонения от прямолинейности их конкретная величина согласовывается между изготовителем и потребителем на стадии подготовки производства и уточняется на стадии выпуска опытных партий.

Определение прямолинейности проводят на плоской ровной поверхности с ровным прямолинейным краем. Обычно в регламентирующих документах для проведения подобных испытаний требуется применение аттестованных поверочных плит. В некоторых случаях возможно по согласованию с потребителем применение более простых средств типа ровной поверхности стола. Образец кладут на эту поверхность параллельно кромке поверочной плиты или измерительного стола и оценивают абсолютное отклонение второго конца профиля от края.

Неравномерное охлаждение может вызвать также скручивание профиля. Этот показатель регламентируется стандартом DIN 16941 как допустимое угловое отклонение сечения профиля на длине 1 м по отношению к начальному сечению. Закручивание оценивается в градусах (табл. 1.8).

Определяют угол закручивания следующим образом: образец профиля длиной 1 м укладывают на плоскую ровную поверхность и угломером измеряют угол закручивания конечного сечения относительно начального.

В поздней редакции стандарта DIN 16941 отказались от допусков для различных термопластов и были приняты общие предельные отклонения по размерам, форме и положению для сечения профиля.

Допуски на линейные, угловые размеры и отклонение формы для профилей из термопластов больше, чем для металлических профилей [12], что связано со свойствами металлов и пластмасс и особенностями производства изделий из них.

Для профилей из термопластов используется более частая разбивка по диапазонам размеров, чем для металлических профилей.

Таблица 1.8. Предельные отклонения для угла закручивания профильных изделий, град

Ряд допусков	Диаметр описанной окружности, мм					
	< 30	30–60	60–120	120–180	180–250	> 250
2A, 3A, 4A	5	4	3,5	3	2,5	2

Назначая предельные отклонения для профилей из термопластов, потребитель должен принимать во внимание затраты на их достижение. Хотя профильные изделия в налаженном производстве изготавливают обычно с более высокой точностью, чем указано в приведенных выше таблицах, излишнее ужесточение допусков нецелесообразно, так как это увеличивает себестоимость продукции и соответственно ее цену. Например, ужесточение допуска на толщину стенки полого профиля может потребовать более мощной вакуумной системы или комбинированного калибрования по наружным и внутренним размерам профиля. Это приведет к установке более производительного вакуум-насоса или нескольких одинаковых насосов. Комбинированное калибрование увеличивает затраты на проектирование, изготовление и наладку процесса, а также усложняет контроль за ним.

Оценку поверхности и оценку внешнего вида чаще всего проводят методом сравнения с согласованным эталонным (стандартным) образцом для каждого вида профиля.

Приведенные выше допуски согласованы между немецкими потребителями и производителями профилей методом шнековой экструзии. Эта регламентация является общим руководством. Хотя производители и следуют ей как можно точнее, нет полной гарантии от отклонений по сравнению с приведенными значениями. В каждом конкретном случае необходимо выяснить причины отклонений и наметить пути их устранения, и только компромиссный подход к этому вопросу позволит решить проблему с наименьшими затратами времени и средств.

Литература

1. Limbach W. Extrudieren von Profilen. Werkzeuge und Profilen. Reifenhauser KG, Sonderdruck aus «B 4007-Extrudieren von Profilen und Rohren». Werkzeuge und Folgeaggregate. VDI-Verlag GmbH, 4 / W. Limbach. — Dusseldorf, 1978. — 30 s.
2. Itoh Kimimasa. Проектирование профильных головок / Itoh Kimimasa // Eng. Mater., 1970. — V. 18. — № 9. — P. 3–16.
3. Профили, прессованные из алюминиевых и магниевых сплавов. Каталог-справочник. Кн.1. / Б. И. Бондарев, Г. В. Лытнева, В. Ф. Николаев и др. — М.: Металлургия, 1989. — 512 с.
4. Bordner P. G. Экструзия пластмассовых профильных изделий / P. G. Bordner, G. C. Fulmer, D. Meadows // Machine Design. — 1968. — V. 40. — № 13. — P. 154–165.

5. Collins S. Возможности экструзии профилей / S. Collins // Plast. Des. Forum. — 1982. — V. 7. — № 6. — P. 61–62, 64–66, 68, 74–75.
6. Berger P. Экструзия профилей и труб / P. Berger // Kunststoffe. — 1977. — Bd. 67. — № 10. — S. 594–598.
7. Limbach W. Экструзия профилей / W. Limbach // Kunststoffe. — 1981. — Bd. 71. — № 10. — S. 668–672.
8. Borth R. Экструзия профилей / R. Borth // Krauss -Maffei News. — № 2. — 1979. — P. 10–14.
9. ГОСТ 19111-73 «Изделия погонажные профильные поливинилхлоридные». — М.: Изд-во стандартов, 1975.
10. ГОСТ 30673-99 Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков. Технические условия. Издание официальное. Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве. (МНТКС). Введен в действие с 1 января 2001 г.
11. DIN 16941. Экструзионные профили из термопластов. Технические условия, 1986.
12. Ерманок М. З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов / М. З. Ерманок, В. И. Фейгин, Н. А. Сухоруков— М.: Металлургия, 1977. — 264 с.

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

Классификация профильных изделий, приведенная в главе 1, возникла на основе использования различных способов их изготовления, так как каждый тип профильного изделия имеет свои конструктивные особенности, которые необходимо учитывать при выборе оборудования, материалов, при испытании и отладке оснастки и технологического процесса. Например, изготовление мягкого профиля из поливинилхлоридного пластика, резиноподобных термоэластопласта или термопластичного полиуретана отличается по аппаратурному оформлению от производства жестких профилей; схема получения армированного профиля включает в состав комплектующего оборудования линии некоторые агрегаты, которые отсутствуют в линии для производства дублированного изделия и т. д.

Ниже рассматриваются основные особенности производства профильных изделий приведенной выше классификации.

2.1. Технологические схемы

Выбор технологической схемы производства профильного изделия и состава оборудования линии определяется его формой, размерами, свойствами материала и назначением изделия.

Вместе с тем одно и то же изделие может быть получено по различным технологическим схемам в зависимости от наличия оборудования, технологической оснастки и технического решения, принятого при разработке технологического процесса. Например, прямоугольный полый профиль может быть получен с использованием формирующего инструмента подобной формы, либо из цилиндрической заготовки с использованием головки для производства труб, либо из широкой полосы, выдавливаемой из щелевой головки с последующим пластическим деформированием экструдата в калибраторе и соединением кромок с помощью, например, сварки или каким-либо другим способом. Выбор технического решения определяется многими объективными и субъективными факторами, наиболее важными из которых являются состав

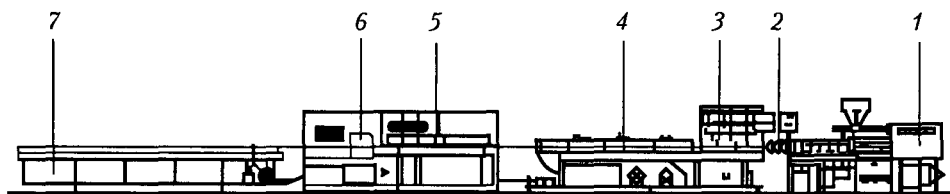


Рис. 2.1. Схема экструзионной линии для производства профильных изделий [2]:

1 — двухшнековый экструдер; 2 — экструзионная головка; 3 — калибровочный стол; 4 — блок калибраторов; 5 — тянущее устройство; 6 — пила; 7 — накопитель

имеющегося экструзионного оборудования, эксплуатационные характеристики изделия и экономические аспекты производства.

При выборе технологической схемы следует учитывать требования к внешнему виду изделия, допуски на размеры и форму, эксплуатационные характеристики оборудования и экструдированного профиля, а также специфические требования к изделию [1].

Большинство профильных изделий из жестких или полужестких материалов получают путем калибрования и предварительного охлаждения экструзионной заготовки (экструдата), выходящей из экструзионной головки, в калибрующих устройствах различных типов. В калибраторе заготовка пластически деформируется, приобретая форму, близкую к периметру рабочего канала калибратора, и предварительно охлаждается. Степень охлаждения зависит от времени пребывания в калибраторе и конструкции устройства. Калиброванный профиль непрерывно отводится тянущим устройством, режется на отрезки требуемой длины и складывается в накопитель приемного устройства. Типовая схема производства жестких профилей из НПВХ показана на рис. 2.1.

Получение некоторых типов профильных изделий из высоковязких и формоустойчивых мягких полимеров типа ПВХ-пластиката, термопластичного полиуретана, некоторых видов термоэластопластов и других резиноподобных полимеров возможно без контактного калибрования только за счет вытяжки и охлаждения экструдата с использованием различного рода направляющих и поддерживающих планок (более подробно эти вопросы рассмотрены в главах 5, 7 и 8).

2.1.1. Трубообразные профили

На рис. 2.2 показана схема получения трубообразных профилей (тип 1), калибруемых с помощью набора калибрующих пластин, установленных в закрытой вакуумной ванне, в которой разрежение создается с помощью водокольцевого вакуум-насоса. На входе в ванну устанавливается короткая калибрующая втулка с отверстиями для вакуума и с индивидуальным водяным охлаждением.

По компоновке комплектующего оборудования технологическая линия аналогична установкам для изготовления обычных труб. Отличительной особенностью схемы

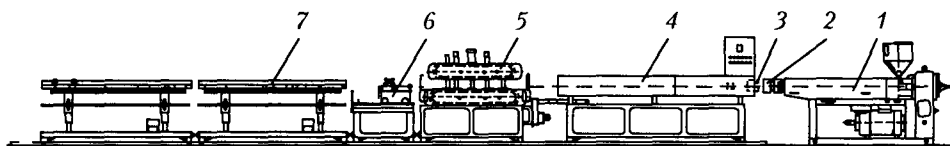


Рис. 2.2. Схема производства трубообразных профилей с использованием вакуумной ванны [1]:
1 — экструдер; 2 — экструзионная головка; 3 — калибрующая втулка; 4 — вакуумная ванна;
5 — тянущее устройство; 6 — пила; 7 — приемное устройство

является возможность формования профиля из кольцевой цилиндрической заготовки. Такой способ позволяет на одном и том же формующем инструменте получать целый ряд трубообразных изделий (прямоугольных, квадратных, треугольных и многоугольных), имеющих близкие значения периметра.

В качестве калибрующего устройства может использоваться также блок «сухих» вакуумных калибраторов. При высоких скоростях экструзии или при недостаточном охлаждении профиля в «сухих» калибраторах может производиться дополнительное охлаждение в открытой или вакуумной ванне с набором калибрующих пластин, установленной за блоком калибраторов. В некоторых случаях использование «сухих» калибраторов более предпочтительно, так как при высокой скорости отвода профиля и при недостаточном количестве калибрующих пластин в вакуумной ванне профиль стремится к форме с наименьшим периметром — цилиндрической, в результате нарушается строгая форма изделия, увеличиваются радиусы скругления в углах, нарушается прямолинейность граней. Это особенно заметно для эластичных материалов, медленно затвердевающих даже при непосредственном контакте с водой, например, для ПЭНП.

2.1.2. Полые и камерные профили

Полые и камерные профили (типы 2 и 3) обычно калибруют с помощью длинномерного вакуумного калибрующего устройства. Формующий инструмент головки по форме поперечного сечения канала аналогичен или близок к форме профиля. Длина калибратора или блока калибраторов и интенсивность охлаждения экструдата при калибровании должны обеспечивать за время калибрования необходимую жесткость и прочность профиля, предотвращающих его пластическую деформацию в последующих за калибратором устройствах. Окончательное охлаждение изделия производится воздухом либо водой в расположенном за калибратором охлаждающем устройстве. Технологическая схема производства таких профилей показана на рис. 2.3, а. Схема длинномерного «сухого» вакуумного калибратора и вакуумной втулки, устанавливаемой на входе в охлаждающую ванну, показаны соответственно на рис. 2.3, б, в.

По этой же схеме возможно получение и трубообразных профилей, однако в этом случае профили будут классифицироваться как полые, а не трубообразные. Это лишний раз показывает условность классификации профильных изделий и ее зависимость от способа производства.

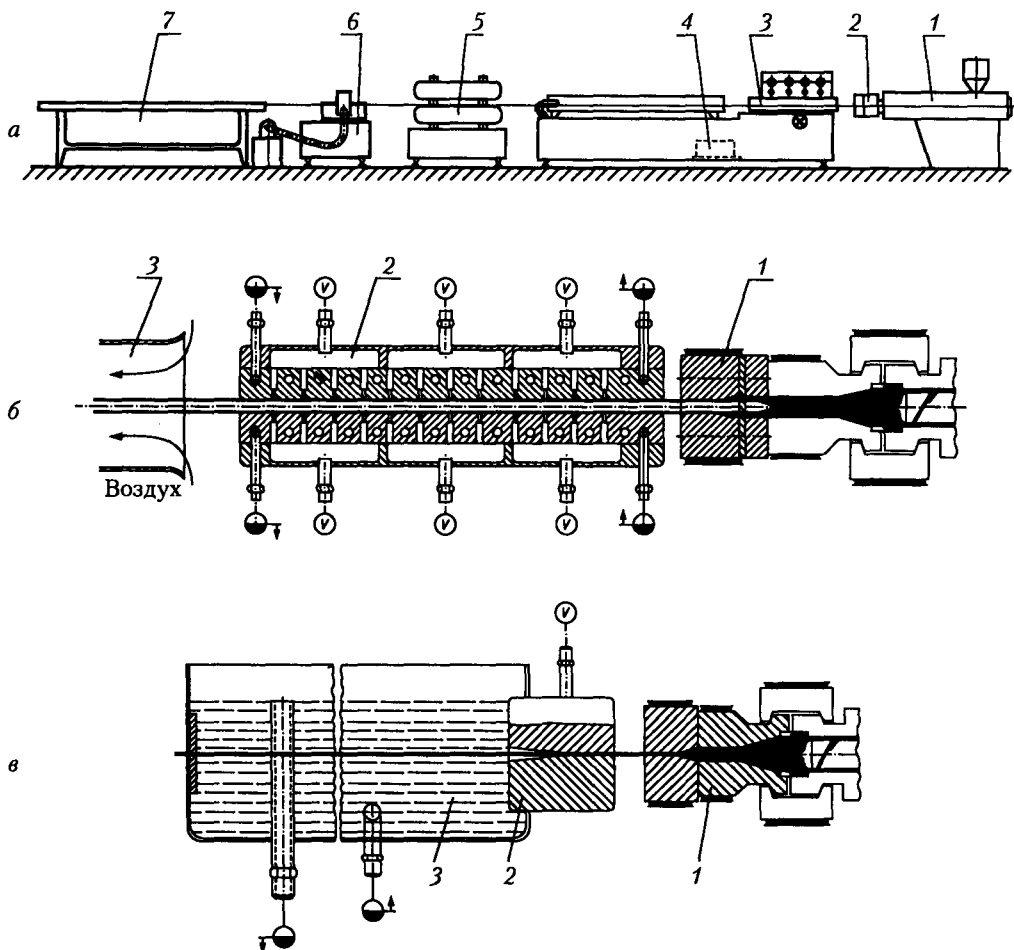


Рис. 2.3. Схема производства полых, камерных и сплошных профилей (а); длинномерный вакуумный калибратор (б); вакуумная втулка на входе в охлаждающую ванну (в) [1]:
 а: 1 — экструдер; 2 — экструзионная головка; 3 — вакуумный калибратор; 4 — калибровочный стол; 5 — тянущее устройство; 6 — пила; 7 — приемное устройство;
 б: 1 — экструзионная головка; 2 — вакуумный «сухой» калибратор; 3 — желоб для охлаждения профиля воздухом;
 в: 1 — экструзионная головка; 2 — вакуумная калибрующая втулка; 3 — открытая охлаждающая ванна

2.1.3. Сплошные профили

Сплошные профили (тип 4) производят по такой же схеме, как полые и камерные (рис. 2.3) с использованием типов калибраторов, указанных на рис. 2.3, б, в. Формующий инструмент по форме аналогичен профилю или близок к нему. Калибрование осуществляется с помощью короткого вакуумного калибрующего устройства, установленного на входе в открытую водяную охлаждающую ванну (рис. 2.3, в). При по-



SINA-PLAST

Полимерное машиностроение КНР,
 поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
 Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

вышенной толщине стенок профиля или высокой скорости экструзии применяют блок «сухих» длинномерных калибраторов и дополнительно устанавливают охлаждающую ванну с набором калибрующих пластин («ванна стабилизации»). Увеличение поверхности контакта расплава с металлом приводит к возрастанию сил трения, что требует применения более мощных тянущих устройств, более сильного прижатия профиля к тракам тянущего устройства или использования методов снижения сил трения при калибровании.

Сплошные профили невозможно прижать вакуумом к стенкам калибратора сразу по всему контуру, поэтому при необходимости получения четкого контура профиля прибегают к протяжке экструдата через канал закрытого калибратора по типу волочения металлов. Однако при таком методе калибрования необходимо очень точно подбирать соотношение размеров фильеры и калибратора, при которых возможно равномерное обжатие экструдата в зоне входа в калибрующее устройство, расплав равномерно заполняет все сечение канала и процесс деформирования стабилен во времени. На практике же часто возникает нестабильность процесса из-за колебания расхода расплава, подаваемого экструдером, скорости отвода профиля тянущим устройством, а также изменения температуры и сил трения в зоне входа в калибратор. Все это и ряд других причин может вызывать колебание размеров экструдата на входе в калибрующее устройство и накопление или, наоборот, уменьшение массы расплава на входе, в результате чего возникает колебательный процесс. В простейших случаях, например, при протяжке цилиндрического прутка, можно использовать автоматическое регулирование скорости подачи расплава от экструдера или скорость отвода прутка тянущим устройством по сигналу датчика, настроенного на определенное положение экструдата перед калибратором [2]. Контактные датчики не очень подходят для такой цели, поскольку требуют охлаждения и сами не должны влиять на форму и свободный проход экструдата, а применение бесконтактных датчиков требует точного фиксирования передающей и приемной ячеек датчика относительно экструдата, что далеко не всегда возможно.

Поэтому калибрование по контуру даже для простых сплошных профилей (например, прямоугольной полосы) невозможно без ручного регулирования размеров экструдата на входе в калибратор и регулирования скорости экструзии. Поскольку регулирование осуществляется в узких пределах, то чаще изменяют частоту вращения шнека экструдера, нежели скорость отвода тянущего устройства, так как регулирование по каналу шнека обычно более точное, чем по каналу отвода изделия. Это связано, видимо, с особенностями схем регулирования скорости в экструдере и на тянущем устройстве промышленных установок, хотя принципиальных различий в том и другом случае быть не должно.

Таким образом, использование калибрования по контуру по типу волочения возможно только в редких случаях. Обычно калибрование экструдата проводят по наиболее ответственному размеру профиля. Например, при изготовлении полосы прямоугольного сечения таким размером является толщина стенки и качество поверхности широкой стороны. Производя обжатие экструдата по толщине при ограниченном или свободном уширении по широкой стороне, можно добиться получения ровной гладкой поверхности профиля с небольшим скруглением в углах. При таком калибровании целесообразно подавать на профиль смазку, например, водяную. Смазку подают

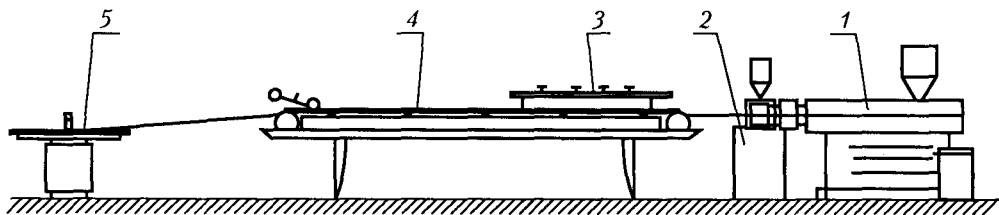


Рис. 2.4. Схема производства мягких комбинированных профилей методом соэкструзии [1]:
1 — основной экструдер с головкой; 2 — соэкструдер; 3 — охлаждающее устройство; 4 — ленточный транспортер; 5 — намоточное устройство

в разрыве между блоками калибратора или через вакуумные отверстия в самом калибраторе, если это не нарушает процесс калибрования и не ухудшает качества поверхности профиля.

Чем более развита поверхность сплошного профиля, тем сложнее его калибровать даже при наличии мощных тянущих устройств.

2.1.4. Комбинированные профили

Комбинированные профили (тип 5), состоящие из двух совместимых материалов, которые могут быть любой формы, получают обычно с помощью двух или более экструдеров, подающих расплавы полимеров в общую головку. Этот процесс называется соэкструзией (или коэкструзией). При этом материалы могут различаться типом полимера, цветом, составом композиции. Калибрование комбинированных профилей осуществляется по стандартным схемам. Для профилей, не требующих калибрования, например, для изделий из ПВХ-пластиката, охлаждение экструдата производят на ленточном транспортере с помощью водяного или воздушного душа или в водяной ванне. При производстве жестких комбинированных профилей состав комплектующего оборудования соответствует одной из указанных выше схем (более подробно схемы производства комбинированных профилей и компоновка оборудования рассмотрены в главе 8). Схема производства профилей методом соэкструзии показана на рис. 2.4.

2.1.5. Профили с сердечником

Профили с сердечником (тип 6) получают по схеме, показанной на рис. 2.5. В качестве сердечника может использоваться любой (в том числе и полимерный) жесткий или мягкий материал: металлическая труба или профиль, проволока или армирующая полимерная сетка. Предварительно подготовленный сердечник (обезжиренный, подогретый, в некоторых случаях предварительно сформованный в виде какого-либо профиля, покрытый адгезивом для лучшего сцепления с оболочкой) подается в угловую или офсетную головку экструдера, где покрывается слоем полимерного материала. В ряде случаев для лучшего сцепления с материалом сердечника наложение обо-

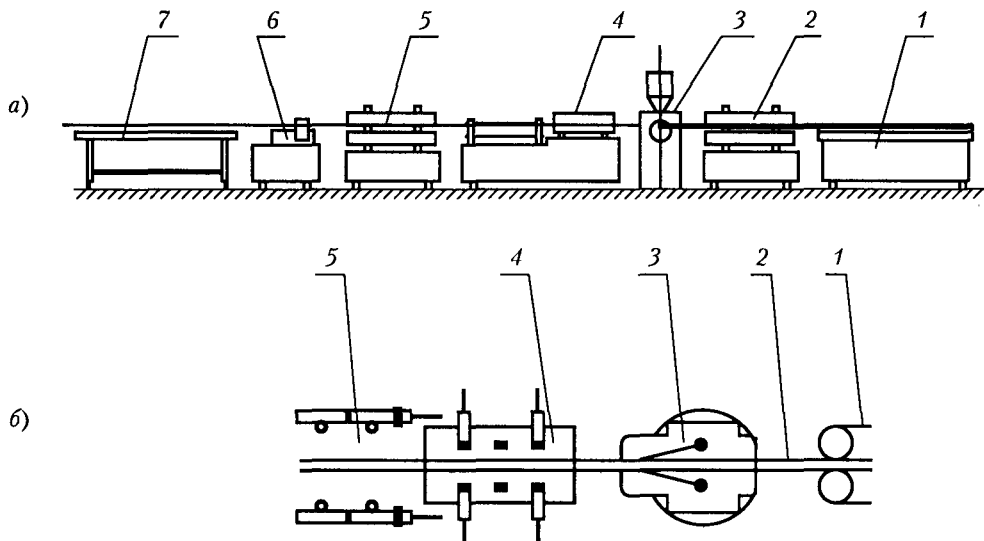


Рис. 2.5. Схема производства профилей с сердечником (а) и узел формирования (б) профиля [1]:

- а: 1 — подающий стол; 2 — толкающее устройство; 3 — экструдер с угловой головкой;
4 — калибр; 5 — тянущее устройство; 6 — режущее устройство; 7 — укладчик;
б: 1 — толкающее устройство; 2 — сердечник; 3 — угловая экструзионная головка;
4 — калибр; 5 — охлаждающее устройство

лочки на сердечник производят под вакуумом. Калибрование и охлаждение профиля производят по одной из рассмотренных выше схем.

Изготовление профилей с сердечником аналогично производству кабельной продукции. Отличия состоят в некоторых деталях, характеризующих особенность процесса. Например, при нанесении полимерного покрытия на отрезки металлической трубы или профиля важно обеспечить непрерывную прямолинейную подачу отрезков сердечника в экструзионную головку. Обычно это обеспечивается установкой перед головкой «толкающего» устройства и синхронизацией работы с основным тянущим устройством, а также бесперебойной работой системы подачи профиля к «толкающему» устройству.

Рассмотренные базовые технологические схемы могут изменяться в зависимости от формы и размеров профиля, материала изделия, его назначения, конструкции технологической оснастки (более подробно производство различных видов профильных изделий рассмотрено в главе 8).

2.2. Комплектуемое оборудование технологических линий

Из рассмотрения технологических схем видно, что экструзионные линии для производства профильных изделий включают типовые агрегаты: экструдер с системами



управления, тепловой автоматики и загрузки сырья, экструзионную головку, калибровочный стол с блоками калибраторов и системой охлаждения, тянущее, отрезное и приемное устройства. Они могут иметь различную конструкцию в разных линиях, могут располагаться по-разному, могут содержать несколько одинаковых агрегатов (например, тянущих устройств). Ниже рассматриваются основные типовые агрегаты, входящие в состав экструзионных линий для производства профильных изделий, и их характеристики.

2.2.1. Экструдеры

Для переработки термопластов используют одношнековые или двухшнековые экструдеры. Первые чаще применяются для переработки гранулированных материалов, вторые — для порошкообразных.

Диаметр шнека D производственных одношнековых экструдеров равен 45–90 мм, длина — 20–30 D .

Одношнековые экструдеры за последние 20–30 лет претерпели существенные изменения. Производители оборудования перешли от красивой компактной формы машин к открытой элементной конструкции машин. Также изменились технические характеристики оборудования. К ним относятся [3, 4]:

- увеличение длины цилиндра и шнека;
- повышение частоты вращения шнека;
- повышение допустимого крутящего момента на шнеке;
- применение приводных двигателей с низким уровнем шума;
- применение перед редуктором многорядной клиноременной или цепной передачи для уменьшения скорости вращения валов на входе в редуктор;
- применение косозубых редукторов с малым уровнем шума и постепенный отказ от применения прямозубых редукторных передач;
- применение мощных электродвигателей и эффективных воздушных систем охлаждения зон цилиндра, отказ от водяного охлаждения;
- использование для изготовления шнеков и цилиндров износостойчивых материалов, применение плазменной обработки, молибденирования деталей;
- оптимизация конструкции шнеков для переработки различных видов пластмасс на основе достижений в области изучения процессов плавления, пластикации и транспортирования вязкоупругих жидкостей;
- применение для загрузки материалов автоматизированных загрузочных и дозирующих устройств, бункерных сушилок материала, снижающих удельные затраты электроэнергии на переработку и способствующие повышению производительности оборудования и качества изделий;
- оптимизация систем нагрева цилиндра, контроля и управления температурой.

Порошкообразные композиции, прежде всего сухие смеси НПВХ, чаще перерабатывают на двухшнековых экструдерах. В этом случае двухшнековые экструдеры имеют преимущества перед одношнековыми:

- не требуется гранулирование композиции, что уменьшает стоимость материала и уменьшает термическую нагрузку на него;



- улучшается качество сырья, обеспечивается возможность окрашивания материала в любой цвет;
- обеспечивается эффективная дегазация и пластикация материала при переработке; обеспечивается высокая однородность расплава по температуре и эффекту смешения;
- производительность оборудования мало зависит от сопротивления головки;
- производительность двухшнековых машин может достигать весьма больших величин, недоступных на одношнековых экструдерах близких размеров.

Двухшнековые экструдеры с параллельными и коническим шнеками, используемые при производстве профильных изделий из НПВХ, обеспечивают производительность от 50 до 500 кг/час и выше.

Современные экструдеры оснащаются микропроцессорной техникой, осуществляющей управлением машиной; на многих машинах устанавливают промышленные компьютеры с выводом на экран основных технологических параметров процесса.

Отечественная промышленность двухшнековые машины практически не производит. Двухшнековые машины ведущих производителей (*Cincinnati Extrusion, Technoplast* (Австрия); *Krauss-Maffei, Weber, Theysonh, Battenfeld, Reifenhauer* (ФРГ); *Amut, Bandera, Bausano* (Италия) и др.) могут иметь различный внешний вид и технические характеристики, но все они обеспечивают высокую производительность, имеют надежную удобную для работы конструкцию и снабжены современной электронной аппаратурой, поддерживающей стабильность работы экструдера и воспроизводимость отработанных технологических параметров процесса.

Линии для производства жестких профильных изделий, аналогичные зарубежным, не производил и не производит ни один отечественный завод. Отечественные предприятия по изготовлению жестких профильных изделий (оконных профилей, подоконников, сайдингов, декоративных панелей, «вагонки», профилированного ячеистого листа и т. д.) используют главным образом зарубежные установки указанных выше фирм, а также турецкое и китайское оборудование.

Экструзионные линии для производства труб и мягких профилей завода «Кузполимермаш» после некоторой модернизации (замена охлаждающих ванн на калибровочный стол, модернизация узла резки и приемного агрегата) могут использоваться для производства многих видов жестких профильных изделий типов 1–4, а при наличии соэкструдера — типа 5.

В Приложениях приводятся адреса некоторых отечественных предприятий, занимающихся изготовлением специализированных экструзионных линий, восстановлением и комплектацией оборудования, и цены на оборудование.

2.2.2. Шнеки

Шнек является основным элементом экструзионной шнековой машины, назначением которого является нагрев и пластикация материала и транспортирование расплава под давлением в экструзионную головку.

Конструкция шнеков зависит от типа машины (одношнековая или двухшнековая) и реологических и теплофизических свойств перерабатываемого материала. Много-



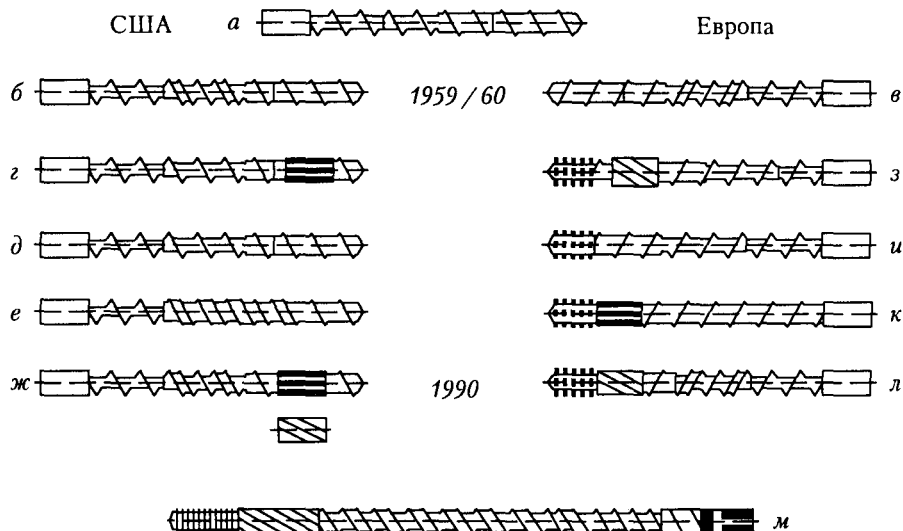


Рис. 2.6. Конструкции шнеков одношнековых экструдеров, применяемых в США и в Европе [5]:
 а – трехзонный компрессионный шнек; б – шнек *Uniroyal*; в – шнек *Maillefer*; з – компрессионный шнек со смесительной секцией Маддока; д – компрессионный шнек со стержневым смесителем; е – барьерный шнек; ж – барьерный шнек со смесительной секцией Маддока; з – пятизонный декомпрессионный шнек с секцией сдвигового воздействия и смесительной секцией; и – компрессионный шнек со стержневой секцией смешения; к – бескомпрессионный шнек с секциями сдвига и смешения; л – барьерный шнек с секциями сдвига и смешения; м – высокопроизводительный барьерный шнек с секциями сдвига и смешения

шнековые машины с количеством шнеков более двух или в комбинации с другими устройствами в настоящее время для производства профильных изделий практически не применяются или используются только для специальных целей и в данной книге не рассматриваются.

Шнеки, используемые для одно- и двухшнековых машин, одинаковы по функциональным признакам, но различаются конструктивно.

Для одношнековых машин применяют обычные стандартные трехзонные шнеки, шнеки со смесительными элементами или удлиненные пятизонные шнеки с зоной дегазации. Последние чаще используются для переработки гигроскопичных материалов, требующих подсушки и удаления летучих веществ. На рис. 2.6 показаны конструкции шнеков одношнековых машин, применяемые в США и Европе, и основные виды барьерных шнеков с различными видами смесительных элементов.

В зависимости от теплофизических и реологических свойств материалов распределение зон шнека одношнековых машин для переработки различных материалов может отличаться. Например, кристаллизующиеся полимеры с высокой степенью кристалличности плавятся в узком диапазоне температур и в течение относительно короткого промежутка времени. Поэтому шнеки для переработки ПЭ, ПП, ПА, полиформальдегида и других кристаллизующихся полимеров имеют короткую зону плав-



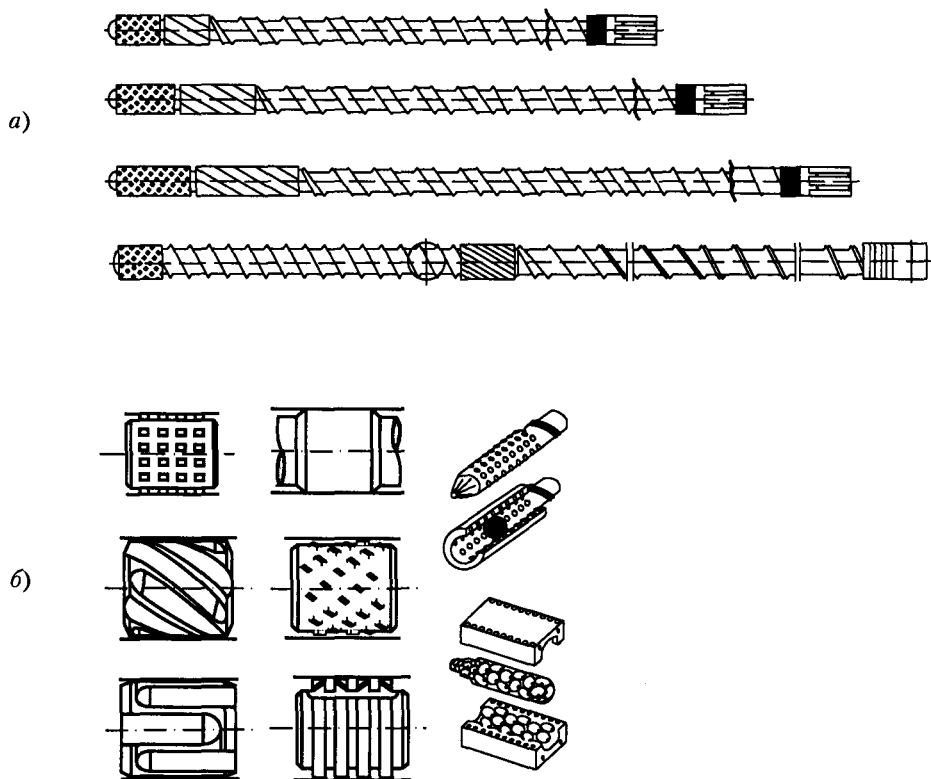


Рис. 2.7. Основные виды барьерных шнеков (а) и виды смесительных элементов барьерных шнеков (б) [5]

ления, равную $0,5-1D$. Напротив, жесткий ПВХ не рекомендуется подвергать интенсивным сдвиговым и растягивающим нагрузкам, которые могут вызвать перегрев материала и разрывы полимерных цепей, в результате чего возможно разложение материала и ухудшение качества расплава и конечной продукции, поэтому для его переработки применяют глубокие шнеки с прогрессивно изменяющейся глубиной нарезки. Более подробно конструкции шнеков для переработки различных материалов рассматриваются в главе 7.

Для ускорения процесса пластикации многих термопластов необходимо интенсивное перемешивание расплава с еще нерасплавленными твердыми частицами материала. С этой целью применяют шнеки, оснащенные пластицирующими и смесительными элементами (рис. 2.7). При переработке полиолефинов рекомендуют применять шнеки с несколькими продольными витками с зубчатым рифлением, в которых расплав подвергается интенсивному сдвиговому воздействию [5]. Иногда на конце шнека устанавливают набор дроссельных шайб с продольными канавками.

Для переработки гранулированных композиций жесткого ПВХ применяют шнеки барьерного типа, в которых на некотором участке основной нарезки имеется вин-



товая нарезка меньшей высоты, угол подъема витков которой несколько выше, чем у основной нарезки.

Применяют также шнеки с цилиндрическими выступами на сердечнике, расположенными в шахматном порядке, обтекая которые расплав интенсивно перемешивается и пластицируется. Такие шнеки целесообразно использовать при переработке материалов с различными добавками: красителями, минеральными или волокнистыми наполнителями. Диспергирование добавок способствует лучшей гомогенизации расплава и улучшению качества продукции [5, 6].

Как уже упоминалось выше, в шнеке непрерывно происходит нагрев, плавление, пластикация и перемещение материала в результате смесительного воздействия витков шнека и дополнительных элементов, устанавливаемых для усиления смесительного воздействия. Протекающие в классическом пластицирующем шнеке процессы условно разделяют на зоны загрузки, плавления и пластикации, а также зону выдавливания или гомогенизации. Четкой границы между зонами не существует, так как протяженность каждой зоны определяется многими факторами, такими как интенсивность внешнего нагрева и тепловыделения в результате механического воздействия на материал, поверхность теплообмена, интенсивность перемешивания материала, скорость перемещения материала к головке, сопротивление головки. В шнеке с зоной дегазации имеется дополнительный участок, на котором происходит декомпрессия материала и отсос летучих веществ, после чего давление снова возрастает и гомогенный расплав нагнетается в головку.

Изменение температуры по длине цилиндра экструдера зависит от теплофизических свойств материала, скорости экструзии и конструкции шнека. Обычно она возрастает от зоны загрузки к экструзионной головке. Это нужно для постепенного нагрева и плавления материала и равномерного продвижения по каналу шнека с минимальными колебаниями давления. Если же материал начинает плавиться уже в зоне загрузки, то могут нарушиться оптимальные условия транспортирования материала и возникнуть колебания расхода и давления, под которым расплав поступает в головку. Механизмы плавления и пластикации полимеров в пластицирующих шнеках экструдеров рассматриваются в многочисленной специальной литературе, например [7–11]; вопросы расчета и проектирования шнеков — в [12–13].

Глубина нарезки компрессионных шнеков изменяется по длине, что создает уменьшение объема витков, так называемую степень сжатия шнека. Степень сжатия шнеков для большинства пластмасс находятся в пределах 2–4. Характеристики шнеков для переработки различных термопластов более подробно рассматриваются в главах 7 и 8.

Шнеки двухшнековых машин имеют более сложную конструкцию, однако функции зон этих шнеков такие же, как и для одношнековых: нагрев, перемешивание, пластикация, гомогенизация и транспортирование расплава под давлением в экструзионную головку.

За рубежом широкое распространение получили относительно небольшие двухшнековые машины для переработки НПВХ с коническими шнеками, позволяющими повысить производительность экструдера и улучшить пластикацию материала.

На рис. 2.8 показаны зацепляющиеся шнеки двухшнековых экструдеров. Часто других применяются шнеки, вращающиеся в противоположных направлениях.



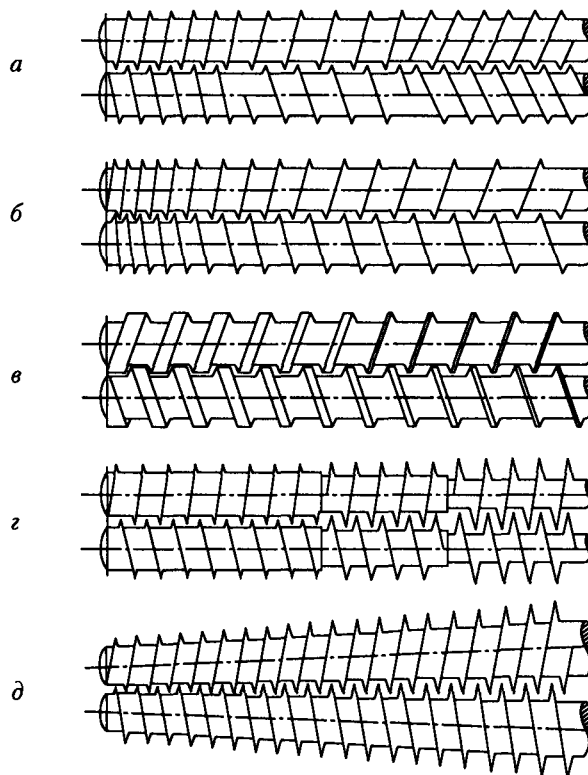


Рис. 2.8. Зацепляющиеся шнеки двухшнековых экструдеров [6]

2.2.3. Технологическая оснастка

Для изготовления любого изделия на экструдер устанавливается технологическая оснастка. Она состоит обычно из экструзионной головки с формующим инструментом для производства конкретного профильного изделия и калибрующего устройства, придающего заготовке конечные форму и размеры. Некоторые типы профилей, главным образом из резиноподобных материалов (пластифицированного ПВХ, термопластичного полиуретана, мягких термоэластопластов), обладающих высоким коэффициентом трения расплава о металл и имеющих высокую вязкость и формоустойчивость расплава, невозможно калибровать обычными методами. Поэтому непосредственного контакта с металлом калибратора расплавы таких материалов не имеют, и калибрование для них в обычном понимании слова не применяется.

Экструзионная головка с фильерой предназначена для формирования полимерной заготовки, из которой после калибрования получают требуемое изделие. Головка состоит из ряда последовательно соединенных деталей, которые преобразуют поток расплава, поступающий из шнека, в пластичную заготовку. Обычно форма заготовки близка к форме конечного изделия, но отличается от него размерами, так как при формировании профиля приходится учитывать неизбежные при выдавливании вязко-



SINA-PLAST

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

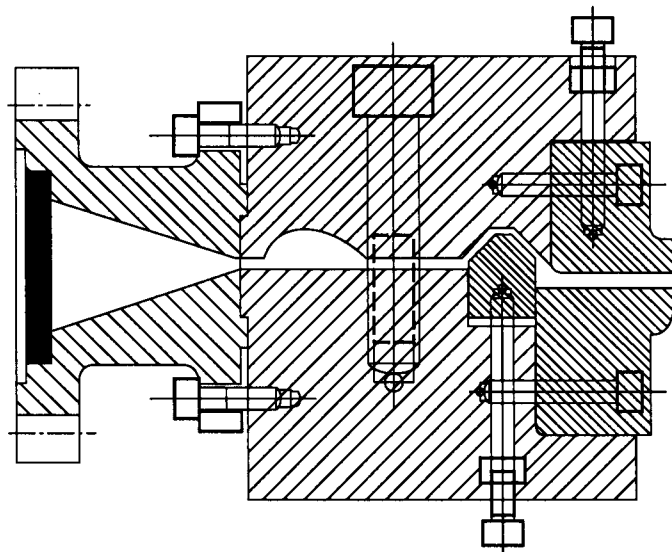


Рис. 2.9. Щелевая экструзионная головка для формирования широкой полосы [6]

упругих жидкостей явления — разбухание экструдата, вытяжку расплава, термическую усадку, неравномерность охлаждения, склонность к образованию остаточных напряжений и прочие эффекты, присущие полимерам.

В некоторых случаях сложные по форме профили получают из заготовок простого сечения. На рис. 2.9 показана щелевая головка для формирования листа или широкой полосы, которая может быть использована, например, для формирования сайдинга (более подробно вопросы постформинга рассматриваются в главах 6 и 8).

Как отмечалось в главе 1, для экструзии профильных изделий используются высоковязкие формоустойчивые марки полимеров. Желательно также, чтобы расплав обладал минимальной адгезией к металлу, имел небольшое разбухание, хорошо тянулся и имел высокую прочность расплава, обладал умеренной скоростью затвердевания при охлаждении, не был излишне чувствителен к неравномерному охлаждению, а также имел высокую скорость релаксации напряжений и упругих деформаций. Такого идеального материала в природе не существует, поэтому необходимы знания о свойствах и особенностях переработки различных термопластов. Этому посвящены главы 7 и 8.

Влияние свойств материалов и режимов формования на конструкцию экструзионных головок и калибрующих более подробно рассматривается в главах 4, 5 и 6.

После головки пластиковая заготовка (экструдат) поступает в калибрующее устройство, где пластически деформируется до конечной формы и предварительно охлаждается. В калибраторе заготовка приобретает несущий слой, толщина и жесткость которого должна быть достаточна для предотвращения пластической деформации профиля после выхода из калибратора (вытяжке от сил трения, смятию в траках тянущего устройства) при максимальной скорости процесса.



Существует много типов калибрующих устройств и способов охлаждения профилей. Основным типом калибрующего устройства в настоящее время является длинномерный вакуумный калибратор, состоящий из одного или нескольких последовательно установленных «сухих» блоков и водяной ванны стабилизации с набором калибрующих пластин, в которой охлаждение осуществляется проточной водой или разбрызгивающими форсунками. Такой способ калибрования, применяющийся последние 10–15 лет, позволил существенно повысить линейные скорости отвода даже толстостенных профилей. Конструкции калибрующих и охлаждающих устройств более подробно рассматриваются в главе 5.

Кроме того, часто стали применяться схемы двух-, трех- и четырехручьевого экструзии несложных по форме профилей, например, штапиков для оконных рам из поливинилхлорида, кабель-каналы небольших размеров и пр. Многоручьева экструзия позволяет более полно использовать производительность экструдера и избежать проблем, связанных с высокой скоростью экструзии и малым временем охлаждения профилей.

В калибраторе расплав должен иметь минимальный коэффициент трения по металлу при установленной температуре расплава и скорости экструзии, быстро затвердевать для устранения нежелательной вытяжки в калибраторе, не быть чувствительным к неравномерности охлаждения. Материалы с таким сочетанием свойств встречаются крайне редко, поэтому приходится создавать условия для проявления этих качеств искусственно. Например, для уменьшения коэффициента трения иногда применяют предварительное охлаждение (воздушное или водяное) экструдата перед входом в калибратор, в материал вводят различные добавки, снижающие коэффициент трения и улучшающий внешний вид профиля (более подробно эти вопросы рассмотрены в главах 4, 5, 7 и 8).

Для производства оснастки используется парк новейших металлообрабатывающих станков и центров: программируемые обрабатывающие центры — станки с ЧПУ, японские или швейцарские электроэрозионные и прошивные станки, микрофрезерные станки. Фильеры и калибраторы для производства «тяжелых» многотоннажных профилей тщательно рассчитываются средствами САПР на основе новейших реологических исследований с помощью новейших компьютерных моделирующих программ.

2.2.4. Калибровочные столы и охлаждающие устройства

Калибровочные столы предназначены для размещения на них калибрующих и дополнительных охлаждающих устройств, вакуум-насосов и коммуникаций для подвода к калибраторам и охлаждающим устройствам воды, вакуума, сжатого воздуха, для размещения средств управления перемещением стола, а иногда и всей линии.

В зависимости от типа и размеров экструдированного изделия и производительности оборудования длина стола может находиться в пределах от 1–1,5 до 4–5 м, а количество устанавливаемых вакуум-насосов — от 1 до 6. На рис. 2.10 и в табл. 2.1 приведены внешний вид и характеристики калибровочных столов фирмы *Battenfeld* (ФРГ), используемые в установках для производства «тяжелых» оконных профилей [14].



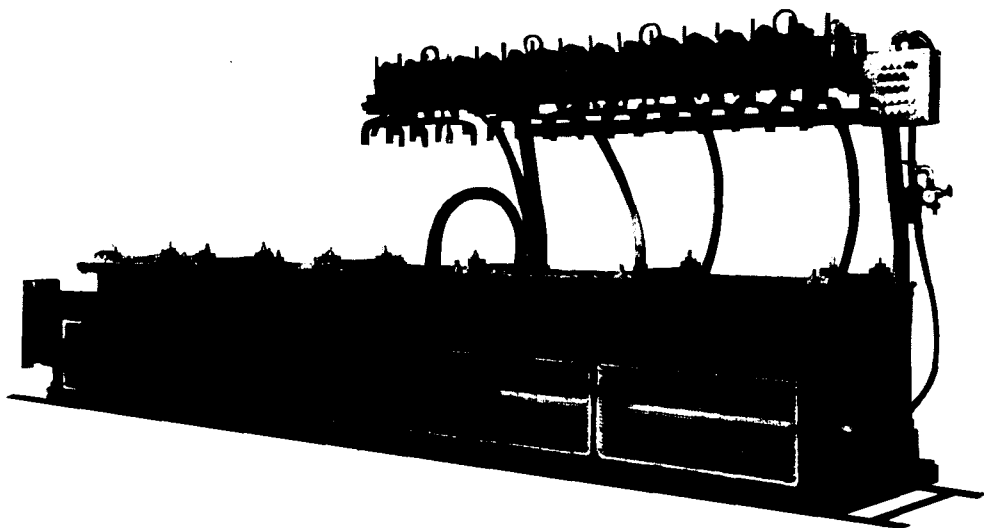


Рис. 2.10. Калибровочный стол фирмы *Battenfeld* (ФРГ), устанавливаемый в линии для производства «тяжелых» профилей [14]

Калибровочные столы некоторых производителей, например, фирмы *Technoplast* (Австрия), имеют дополнительно регулировку угла наклона стола по отношению к основанию как в продольном, так и в поперечном направлениях.

В современных конструкциях калибровочных столов большое внимание уделяется удобству обслуживания всех компонентов агрегата. Калибраторы и дополнительные устройства охлаждения монтируются на специальных алюминиевых плитах, которые являются принадлежностью технологической оснастки для каждого типа профильного изделия. При необходимости смены оснастки весь блок («сухие» длинномерные калибраторы и дополнительные ванны стабилизации вместе с плитой, на которой они закреплены) снимается и заменяется на другой.

Воздух отделяется от воды в специальных емкостях разделения, оснащенных фильтрами и встроенными датчиками уровня, которые подают команду на автоматическое включение перекачивающих воду центробежных насосов при понижении уровня воды ниже установленного [15].

2.2.5. Тянущие устройства

Тянущее устройство предназначено для непрерывного и равномерного отвода профиля; от его стабильной работы зависит бесперебойность технологического процесса и качество продукции. Тянущее устройство должно работать с постоянной скоростью, регулируемой в широких пределах и не зависящей от нагрузки, плотно прижимать профиль к тракам или лентам, не допуская проскальзывания изделия при повышении сопротивления, не деформировать профиль при сжатии между траками, иметь

Таблица 2.1. Технические данные калибровочных столов фирмы *Battenfeld* (ФРГ) [14]

Тип стола	Вакуум-насосы			Размеры стола			Пределы регулирования, мм			Присоединений		Макси- мальное тяговое усилие, <i>H</i>
	Количе- ство, шт.	<i>N</i> , кВт	Q , м ³ /час	Длина	Ширина	<i>n</i>	Длина	Ширина	Высота	Вакуум	Вода	
K50V1	1	2,2	35	2000	600	2	600	±40	100	8	6	7500
K50V2	2	4,4	70	2500	600	4	600	±40	100	16	12	7500
K 160V2	2	8,0	168	2500	600	4	900	±40	100	16	12	15000
K 250V 2	2	11,0	324	4200	675	4	900	±40	100	16	12	25000
K 250V 3	3	16,5	486	5000	675	6	900	±40	100	24	18	25000
K 400V 2	2	11,0	324	5000	675	4	900	±50	150	16	12	40000
K 400V 3	3	16,5	486	5000	675	6	900	±50	150	24	18	40000
K 400V 2	2	11,0	324	6000	675	4	900	±50	150	16	12	40000
K 400V 3	3	16,5	486	6000	675	6	900	±50	150	24	18	40000
K 400V 4	4	22	648	6000	675	8	900	±50	150	32	24	40000

N — мощность привода; *Q* — производительность, м³/час при разрежении 40 торр; *n* — количество фиксаторов.



SINA-PLAST

Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru
 Полимерное машиностроение КНР,
 поставки оборудования в Россию и страны СНГ.

высокое тяговое усилие. Величина тягового усилия зависит от количества устанавливаемых «сухих» калибраторов, дополнительных калибрующих пластин и других средств, создающих сопротивление отводу профиля. Ориентировочные значения максимального тягового усилия, которые должны преодолеть тянущие устройства при производстве различных видов профилей, показаны в табл. 2.1.

Технические характеристики тянущих устройств обычно приводятся в фирменных проспектах, информационных и рекламных материалах. Основные типы и характеристики тянущих устройств экструзионных линий для производства профильных изделий рассмотрены, например, в [1, 14, 15].

Для отвода «легких» некалибруемых профилей могут применяться ленточные транспортеры с одним или двумя прижимными роликами. Обычно здесь же производится охлаждение изделия с помощью струи воздуха или водяного душирования. Профили, которые при изготовлении подвергаются калиброванию, отводят роликовыми или гусеничными тянущими устройствами.

Прижим роликов или траков к профилю осуществляется с помощью механических, пневматических или гидравлических устройств. Иногда тянущие устройства снабжаются приборами контроля скорости отвода, усилия прижатия, тягового усилия.

На рис. 2.11 показаны схемы траковых тянущих устройств. Устройство, схема которого приводится на рис. 2.11, а, снабжено приводным механизмом для перемещения верхней гусеницы и прижатия ее к профилю. Это осуществляется вручную или с помощью электрического двигателя или пневмоцилиндра.

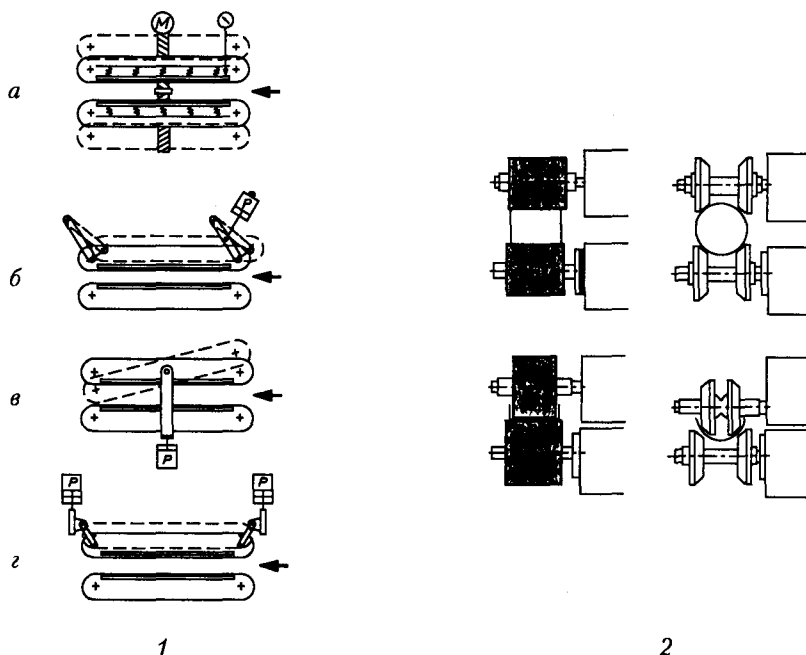


Рис. 2.11. Схемы траковых (1) и роликовых (2) тянущих устройств [1, 16]



SINAPLAST

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

Тянущее устройство, изображенное на рис. 2.11, б, содержит коленно-рычажный механизм, который с помощью источника давления перемещает в горизонтальном и вертикальном положении одну из гусениц. Ширина гусениц невелика. Количество гусениц может быть от 2 до 8; при числе гусениц более двух таким устройством можно отводить только профили, для которых расстояние от центра до периферии одинаково (трубы, квадратные, многоугольные полые профили).

В устройстве, приведенном на рис. 2.11, в, используется качающаяся верхняя гусеница. Это позволяет избежать поломки деталей устройства при изменении высоты профиля, что особенно важно при запуске, когда процесс еще не стабилизировался и высота изделия непостоянна.

Мощные тянущие устройства (рис. 2.11, г) имеют значительные габариты и массу. Перемещение верхней гусеницы осуществляется с помощью двух пневмо- или гидрочилиндров.

Для относительно небольших профилей диапазон скоростей отвода тянущим устройством находится в пределах 0,5–10 м/мин, для массивных профилей — 0,01–3 м/мин.

Форма и размеры роликов или башмаков тянущего устройства зависит от типа extrudированного профиля и материала, из которого его получают. С помощью сменных роликов или башмаков можно отводить изделия разной конфигурации. На рис. 2.11 (2) показаны примеры типов профилей, которые можно отводить при изменении формы роликов роликового тянущего устройства.

Общий вид тянущего устройства средней мощности и технические характеристики траковых тянущих устройств приведены на рис. 2.12 и в табл. 2.2.

2.2.6. Режущие устройства

Режущие устройства используются в линиях для производства жестких профилей. Для резки тонкостенных и малогабаритных профилей могут использоваться рубящие гильотины, которые производят практически мгновенную рубку профиля на прямолинейные отрезки заданной длины, определяемой положением датчиков, дающих команду на резку. От геометрии режущей кромки ножа, угла заточки и угла резания зависит качество резки и долговечность режущего инструмента. Эти вопросы подробно разобраны в [17].

Гильотина снабжается направляющими и опорными плитами, форма которых устанавливается в зависимости от геометрии внешнего контура профильного изделия. Привод ножа осуществляется от пневмо- или электрической системы управления. С помощью гильотин могут разрезаться разнообразные тонкостенные сплошные профили типа 4: уголки, П-, Ш-, Т-, Н-образные профили небольшой высоты.

Основной вид применяемых режущих устройств — вращающийся корундовый диск или высокоскоростная дисковая фреза с большим количеством мелких зубьев. Диски или фрезы могут подводиться к отрезаемому профилю сбоку, сверху или снизу в зависимости от конструкции узла резки. Используемые схемы резки жестких extrudированных профилей показаны на рис. 2.13.

По схемам 1.1 и 1.2 пила опускается или поднимается и режет отводимый профиль. Режущее устройство во время резки перемещается вместе с профилем, по окончании резки пила возвращается в исходное положение. Схема с нижним расположе-

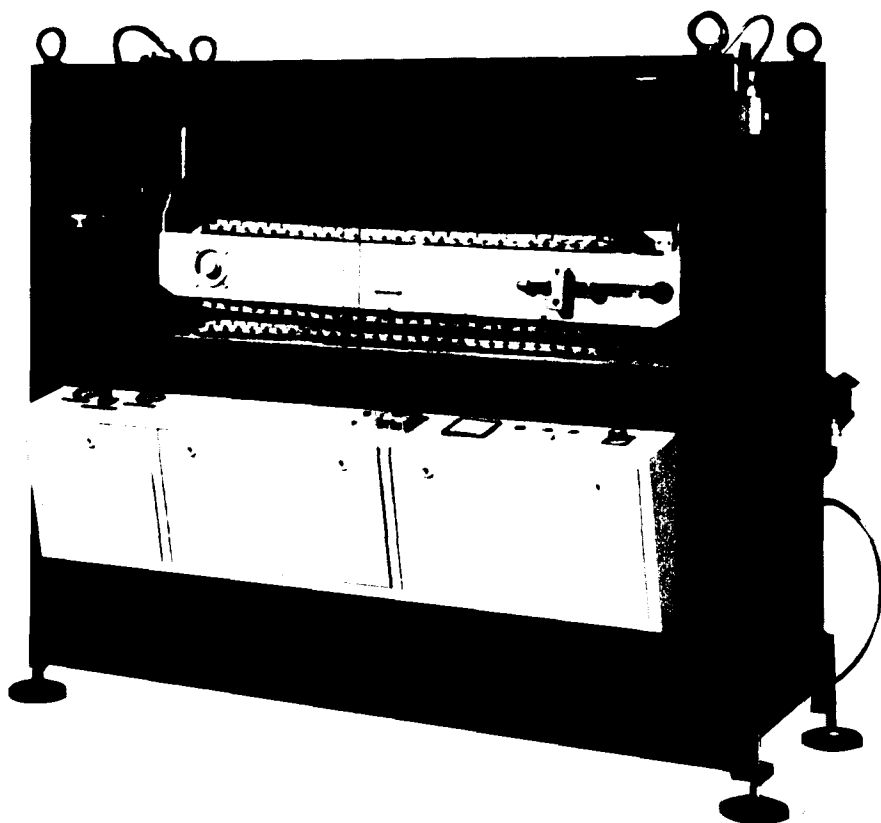


Рис. 2.12. Трактовое тянущее устройство [14]

Таблица 2.2. Технические данные тянущих устройств фирмы *Battenfeld* (ФРГ) [14]

Тип	P 50 S	P 100 S	P 160 S	P 300 S
Максимальная ширина траков, мм	160	160	160	300
Максимальная высота между лентами, мм	100	160	200	300
Длина контакта с профилем, мм	600	800	1200	2250
Максимальное тяговое усилие, Н	2500	6000	8000	40000
Диапазон скорости отвода, м/мин	0,8–20	0,6–15	0,4–10	0,07–1,75
Количество резиновых башмаков	110	132	174	220
Мощность привода, кВт	1,5	2,5	2,5	3,4
Тип привода	Двигатель постоянного тока			
Длина, мм	1760	2000	2400	3900
Ширина, мм	900	900	900	1200
Высота, мм	1800	1800	1800	2100
Масса, кг (ориентировочно)	700	700	750	2750

**SINA-PLAST**

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

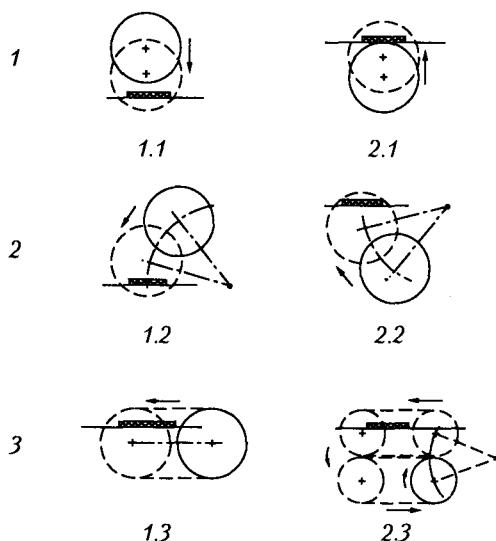


Рис. 2.13. Схемы режущих устройств, применяемые в линиях для производства профильных изделий:

1.1, 2.1 — с верхним и нижним расположением режущего узла; 1.2, 2.2 — с качающимся режущим узлом; 1.3, 2.3 — комбинированные устройства для резки широких профилей [1]

нием режущего узла применяется чаще, поскольку более безопасна и создает меньше шума и запыленности. Схемы 2.1 и 2.2 с качающимся режущим узлом проще в эксплуатации и наладке, но их применение ограничено размерами профилей и расположением режущего узла относительно профиля. Для резки широких профилей применяются схемы 3.1 или 3.2, представляющие собой комбинацию схем 1 и 2, в которых вертикальное перемещение режущего узла заменено на горизонтальное.

2.2.7. Приемные устройства

Приемное устройство обычно представляет собой установленный на станине опрокидывающийся лоток длиной 3–6 м, по которому профиль скользит до момента отрезки. На лотке устанавливают датчики положения, например, конечный выключатель, который при контакте с профилем включает режущее устройство. Лоток может опрокидываться с помощью пневмоцилиндра или соленоида, в результате чего отрезанный профиль падает в накопитель, откуда изделия периодически удаляются.

2.2.8. Дополнительные устройства

Помимо указанного оборудования экструзионные линии часто оснащаются устройствами для загрузки сырья, бункерными сушилками, механизмами для автоматизированной упаковки продукции, маркирующими устройствами (например, на основе



струйных принтеров), датчиками контроля формы и размеров. Некоторые из них рассмотрены в главе 8.

2.3. Производительность технологической линии

Производительность линии по изделию всегда меньше, чем указанная в паспорте пластикационная способность экструдера. Она зависит от формы и размеров профиля, свойств перерабатываемого материала, конструкции используемой технологической оснастки и пр.

Различают производительность экструдера, пропускную способность экструзионной головки и калибрующего устройства. Ограничение производительности экструдера зависит от его конструкции (мощности привода, диапазона частоты вращения шнека, его конструкции), характеристики системы тепловой автоматики, расположения термодатчиков на цилиндре экструдера, работы системы воздушного охлаждения зон цилиндра и т. д.

Высокое сопротивление экструзионной головки создает повышенное давление на входе в головку и ограничение прямого потока, создаваемого шнеком. Чем выше сопротивление головки, тем выше давление на конце шнека и меньше производительность экструдера. Предельное давление, развиваемое шнеком, соответствует нулевой производительности экструдера и определяется из уравнения производительности экструдера при объемном расходе $Q = 0$; [7–13].

При экструзии малогабаритных профилей из высоковязких материалов высокое давление в головке препятствует повышению частоты вращения шнека и производительности экструдера, при этом ограничение производительности линии обусловлено конструкцией экструзионной головки. Если профиль имеет небольшие размеры, простую форму и условия калибрования не вызывают затруднений, то для повышения производительности целесообразно применение двухручьевой или многоручьевой головки: в этом случае давление на входе в головку снижается, что позволяет увеличить частоту вращения шнека и производительность экструдера и линии в целом.

В большинстве случаев производительность линии лимитирует узел калибрования и охлаждения, особенно если экструдируется толстостенный профиль, которому во избежание деформации в тянущем и режущем устройствах необходимо более длительное время охлаждения при калибровании. То же касается камерных профилей внутри полостей которых могут находиться элементы, не соприкасающиеся с охлаждаемыми поверхностями непосредственно при калибровании. Такие выступы и полости охлаждаются только за счет теплопроводности через стенки.

С другой стороны, для некоторых материалов (например, ПК, ПММА) приходится сознательно ограничивать производительность линии, так как интенсивное охлаждение приводит к огрублению поверхности, потери глянца и образованию в изделиях значительных остаточных напряжений, поэтому скорость получения изделий из таких материалов ниже, чем аналогичных изделий из материалов, не имеющих таких ограничений. Для открытых профилей, охлаждаемых обычно со всех сторон, линейная скорость отвода, как правило, выше и может достигать десятков метров в минуту.





Таблица 2.3. Производительность экструзионных линий при изготовлении различных профилей из НПВХ [16, 18]

Профиль	Габаритные размеры × толщина стенки, мм	Материал	Площадь поперечного сечения, см ²	Масса 1 м, кг/пог. м	Производительность		Тип экструдера	Способ калибрования
					кг/ч	м/мин		
Оконная рама	58 × 64 × 3,5	НПВХ	9,64	1,31	110	1,4	Двухшнековый Trimec 2 × D105	(1)
Направляющая для штор	55 × 15 × 1,5	НПВХ	2,67	0,37	78	3,5	Двухшнековый Trimec 2 × D86	(1)
Сайдинг	250 × 1,9	НПВХ	2,66	0,37	200	9,0	CE ARGOS 2 × D90	(2)
Кабель-канал	20 × 10 × 1	НПВХ	Периметр 60 мм	0,11	43	8,0	CE Titan 2 × D55	(3)
Кабель-канал	100 × 60 × 2	НПВХ	Периметр 320 мм	0,66	158	4,0	CE Titan 2 × D55	(1) + (3)
«Вагонка»	115 × 10 × 0,45	НПВХ	2,40	0,18	120	5,0	Trimec 2 × D105	(4)
«Вагонка»	110 × 10 × 0,5	НПВХ	—	0,185	155	7,0 × 2	KME 120 × 2 Krauss-Maffei	(1)
Кожух светильника	100 × 72	ПММА	—	0,46	44	1,6	KME60 × 1–25B	(1) 1 × 150 + +2 × 125
Клипса	18,4 × 5,8 × 1,1	АБС	—	0,045	41	15	KME60 × 1–25	(5) + (3)

Примечания. D — диаметр шнека; CE — Cincinnati Extrusion (Австрия).

(1) — длинномерный вакуумный калибратор; (2) — короткая втулка с водяной смазкой и профилирующие валки с охлаждением; (3) — вакуумная ванна с калибрующими пластинами; (4) — 2–3 блока «сухих» вакуумных калибраторов, разделенных короткими ваннами с водой; (5) — короткая втулка с подачей воды для смазки.

Таблица 2.4. Выбор типа одношнекового экструдера при экструзии профилей из НПВХ [16]

Площадь поперечного сечения, мм ²	Толщина стенки, мм	Тип экструдера (диаметр шнека/длина шнека, L/D)	Производительность линии, кг/час
50–660	0,2–5	45/20–28	20–30
100–1100	0,5–5	60/25–28	30–45
200–2000	1–5	90/25–28	45–60

2.3.1. Выбор экструзионной линии для производства профилей

При наличии парка экструдеров различных размеров можно выбрать оптимальную машину для производства конкретного изделия. Исходными данными для этого являются размеры, форма, масса 1 м профиля, максимальная производительность процесса, а также укомплектованность линии всеми необходимыми агрегатами, их состоянием, загруженностью и т. д. Последние факторы являются субъективными организационными факторами, но они также влияют на выбор оптимального оборудования для конкретной задачи.

Для примера в табл. 2.3 приведены данные по производительности линий разных фирм при изготовлении некоторых видов профилей из НПВХ.

Из одношнековых экструдеров для производства следует использовать машины с диаметром шнека не менее 45 мм. Такой экструдер позволяет получать профили с толщиной стенки 0,2–5 мм и площадью поперечного сечения 50–600 мм². В табл. 2.4 приведены обобщенные фирменные рекомендации по выбору экструдера в зависимости от размеров профиля из ПВХ и производительности процесса.

Японские фирмы рекомендуют при массе 1 пог. м профиля менее 100 г использовать одношнековый экструдер с диаметром шнека 40 мм, для $q = 100–700$ г/м — 50 мм, для $q = 800–900$ г/м — 65 мм, для $q = 1000–2000$ г/м — 90 мм, более 2000 г — экструдер с $D = 120–150$ мм или двухшнековый экструдер соответствующей производительности [16].

Литература

1. Limbach W. Extrudieren von Profilen. Werkzeuge und Profilen. Reifenhauser KG, Sonderdruck aus «B 4007-Extrudieren von Profilen und Rohren». Werkzeuge und Folgeaggregate. VDI-Verlag GmbH, 4 / W. Limbach. — Dusseldorf, 1978. — 30 S.
2. Hensen F., Knappe W., Potente H. Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik. Bd. 2 Extrusionanlagen. — Munchen, Wien: Carl Hansen Verlag, 1986, S. 708.
3. Оборудование для переработки термопластичных материалов / Под рук. В. К. Завгороднего; ВИНТИ. — М., 1977. — 80 с. — («Итоги науки и техники». Сер.: «Химическое, нефтеперерабатывающее, полимерное машиностроение»).



4. Reitemeyer P. Трубы из термопластичных пластмасс. Новые конструкции установок для производства труб из термопластичных пластмасс. — Доклад на симпозиуме в Москве фирмы «Reifenhauser», ФРГ. — 1979, август. — 22 с.
5. Fischer P., Wortberg J. Single-Screw Extruders and Barrier Screws. Extended version of a paper presented at the VDI conference on «The Single Screw Extruder — Basics and System Optimization», published by VDI-Verlag Duesseldorf, 1997 «Kunststofftechnik», 17 S.
6. Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch. 2. Extrusion. Badische Anilin- & Soda-Fabrik AG (BASF), 6700 Ludwigshafen, ФРГ. — 1971. — 268 S.
7. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс (Принцип действия, конструирование и эксплуатация) / Г. Шенкель; Пер. с нем. под ред. А. Я. Шапиро. — Л.: ГНТИ химич. лит-ры, 1962. — 467 с.
8. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт; Пер. с англ. под ред. Г. В. Виноградова. — М.: ГНТИ химич. лит-ры, 1962. — 747 с.
9. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Келви; Пер. с англ. — М.: Химия, 1965. — 442 с.
10. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (Механика процессов) / Р. В. Торнер. — М.: Химия, 1977. — 464 с.
11. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Когос; Пер. с англ. под ред. проф. Р. В. Торнера. — М.: Химия, 1984 — 632 с.
12. Рябинин Д. Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. — М.: Машиностроение, 1965. — 363 с.
13. Verfahrenstechnische Auslegung von Plastifizier- und Schmelzeaggregaten. 1-st Kunststofftechnisches Seminar. Paderborn, 2-3 Juli 1986. — 239 S.
14. Battenfeld Extrusionstechnik. Calibrating units for profiles. Double haul-offs for profiles 1. Kalibriereinsatze fuer Rohre. Profileextrusion. Проспекты 1986 г.
15. Technoplast. Техника для выпуска профилей. We know how, 1996, Profile Extrusion Tools, Austria Export Prospects.
16. РТМ по расчету и конструированию технологической оснастки для экструзии профильных изделий из термопластов: ротапринт / НПО «Пластик». — М.: 1983. — 382 с.
17. Paladini R. Extrusion cutter knife Design: six basic pointers / R. Paladini // *Plastics Technology*. — 1977. — V. 23. — № Т-5. — P. 83, 85, 87, 89, 91.
18. Коваль В. В. Выбор экструзионной линии для производства ПВХ профилей / В. В. Коваль // <http://www.build.ru>.



ГЛАВА 3. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Как отмечалось в главе 1, профильные изделия могут быть изготовлены из любых термопластов. Тип и марка материала выбирается в зависимости от назначения изделия и требований к его свойствам.

По сравнению с традиционными материалами (металлами, деревом, керамикой, стеклом и т. д.) полимеры проявляют специфические свойства, которые необходимо учитывать при выборе материала и прогнозировании поведения изделия при эксплуатации. Это ползучесть, низкий модуль упругости, повышенный коэффициент термического расширения, релаксационные свойства, относительно низкая температура эксплуатации, старение и снижение механических характеристик, зависимость свойств от скорости нагружения и т. д.

В области изучения свойств полимерных материалов накоплен огромный опыт, поэтому в настоящей главе рассматриваются только свойства, связанные с эксплуатацией профильных изделий и оценкой технологических свойств материалов при переработке.

3.1. Эксплуатационные свойства термопластов

Термопластичные пластмассы делятся на два больших класса: аморфные и кристаллизующиеся, которые отличаются по поведению при эксплуатации и переработке. К аморфным относятся поливинилхлориды, полистиролы, полиакрилаты, эфирцеллюлозные пластики, поликарбонат, к кристаллизующимся — полиолефины, полиамиды, полиацетали. Четкой границы между ними нет, так как некоторые виды и марки пластмасс в зависимости от модификации могут проявлять свойства обоих классов.

При эксплуатации изделия подвержены различного рода воздействиям: механическим, термическим, электрическим, атмосферным, воздействию агрессивных сред и т. д. Изменения физико-механических характеристик материала, формы и размеров изделия связаны с непрерывно протекающими в материалах физико-химическими процессами старения, релаксации и ползучести.

Большинство изделий работают в определенных конструкциях, и их поведение определяется наложенными связями и внешними ограничениями.

При определении срока работоспособности и надежности изделия из полимерного материала в качестве основного критерия, как полагают [1], следует принимать допустимые деформации, а не предельные характеристики, связанные с разрушением изделия. Это требование влечет за собой отказ от необходимости строго сохранять стабильность формы детали под действием внешних сил. Например, если полимерную деталь жестко закрепить без учета температурных изменений материала, то она может разрушиться и при отсутствии внешних нагрузок. Тепловое расширение у полимеров на порядок выше, чем у традиционных материалов, поэтому весьма важное значение имеет применение компенсаторов теплового расширения. Например, если при установке уплотнителя из полимерного материала не принять меры для компенсации температурных изменений его длины, то он не будет в полной мере выполнять свои функции, поэтому приходится ограничивать изменение длины изделия путем его закрепления, в результате чего в нем возникают локальные напряжения в местах закрепления, которые при неблагоприятных условиях могут привести к разрушению изделия. Прогнозируя работоспособность детали, важно предсказать предельную деформацию и время ее развития до критического уровня, а также оценить влияние внешних факторов на поведение изделия в сборочном узле.

Стабильность свойств изделий из пластмасс и их долговечность зависят от таких факторов, как температура эксплуатации и влажность; уровень напряжений, возникающих под действием внешних сил; уровень остаточных напряжений; скорость приложения нагрузки и время ее воздействия; наличие неблагоприятных факторов, вызывающих опасность преждевременного выхода изделия из строя (концентраторы напряжений, влияние климатических факторов и т. д.).

Большинство изделий из промышленных термопластов может эксплуатироваться в сравнительно узком (например, по сравнению с металлом или деревом) диапазоне температур: обычно от минус 20–30 °С до плюс 80–100 °С. Этот диапазон можно расширить, применяя химическое модифицирование, наполнения и пластификацию. Например, пластификация ПВХ может увеличить его морозостойкость до минус 50–60 °С; хлорированный ПВХ, напротив, имеет теплостойкость до плюс 130–135 °С. Использование минеральных наполнителей повышает жесткость пластмасс, снижает термическое расширение и термическую усадку при переработке; введение коротких стеклянных волокон значительно повышает механические характеристики изделий, введение металлических наполнителей повышает теплопроводность, теплостойкость и улучшает электропроводность.

В зависимости от температуры полимеры могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном (твердое тело), высокоэластическом (каучукоподобное тело) и вязкотекучем (вязкая жидкость). Начало перехода материала от твердого состояния к состоянию вязкой жидкости определяет верхнюю температуру эксплуатации полимерных изделий, характеризующую теплостойкость материала и называемую температурой стеклования T_g . Конец этого интервала называют температурой текучести T_f . Чем больше разность $T_f - T_g$, тем шире эксплуатационные возможности полимера.

Отличие от аморфных полимеров температурная зависимость деформации кристаллизующихся полимеров до определенного момента значительно ниже. По дости-

жении температуры плавления кристаллитов жесткость материала резко снижается, а деформация возрастает. Чем выше кристалличность полимера, тем больше его температурная устойчивость. Аморфно-кристаллические полимеры занимают по температурной устойчивости промежуточное положение между высококристаллическими и аморфными полимерами.

Температура стеклования T_g не является физической константой материала и зависит от способа определения, скорости нагрева и приложенной нагрузки [2]. В табл. 3.1–3.2 показаны термические свойства некоторых материалов и диапазон их переработки.

Таблица 3.1. Термические свойства некоторых термопластов

Пластмасса	Теплостойкость по ISO R75, °C		Температура размягчения по Вика, °C		Область температур применения материалов, работающих под нагрузкой, °C	
	Метод А (1,85 МПа)	Метод В (0,46 МПа)	Метод А (1,0 кгс)	Метод В (5,0 кгс)	минимальная	максимальная
ПЭНП	35	—	88	40	–40	50
ПЭСП*	—	—	113	55	—	—
ПЭВП	50	—	123	63	–20	60
ПП	55	—	152	100	–5	100
ПА-6	90	190	—	215	–10	90
ПА-12	50	145	175	170	–10	80
НПВХ	68	—	—	—	–5	60
ПК	132	139	—	140–150	–30	60**
АБС	90	95	—	96	–30	80

ПЭСП — полиэтилен средней плотности; ** — испытание в воде.

Таблица 3.2. Температуры стеклования и переработки (экструзия и литье под давлением) некоторых термопластов

Аморфные полимеры			Кристаллизующиеся полимеры		
Материал	T_g , °C	Температуры переработки, °C	Материал	T_g , °C	Температуры переработки, °C
ПС	70	200–250	ПЭНД	–120	220–320
АБС	85–110	180–240	ПП	–10	180–280
НПВХ	80	160–210	ПФА	–70	180–230
ПММА	90	170–260	ПЭТ	60	260–280
ПК	140	280–320	ПА6	40	230–290
ПФО/ПС	100–130	250–300	ПА12	55	190–270

Из табл. 3.1 видно, что теплостойкость в значительной степени зависит от методики испытания, что свидетельствует о необходимости сравнения материалов при одинаковых условиях или использования международных методик.

Температура стеклования T_c характеризует теплостойкость материала изделия, которое по условиям эксплуатации должно оставаться твердым телом, и его морозостойкость, если оно работает в высокоэластичном состоянии (например, уплотнительные прокладки) [2].

Существующие в настоящее время стандарты на испытания материалов служат для сравнительной оценки определенных групп материалов, близких по свойствам. Считается, что стандартов на испытание должно быть столько, сколько имеется типовых материалов для деталей и типовых условий их эксплуатации [3]. Такое положение, по-видимому, будет существовать довольно долго, пока не накопится опыт, достаточный для экстраполяции и определения эмпирических коэффициентов, позволяющих осуществлять переход от одного материала к другому и от одних условий эксплуатации к другим.

Поскольку прочностные и деформационные свойства полимеров зависят также от температуры и влажности, то для исключения влияния влажности образцы перед испытанием необходимо кондиционировать в условиях, соответствующих максимуму поглощения влаги при эксплуатации. Испытания проводят при стандартных значениях температур: при нормальной (23°C), нулевой (0°C), при отрицательных (например, минус 20 – 40°C), а также при повышенных. Значения температур испытания материалов и изделий из них регламентируются государственными и отраслевыми стандартами и техническими условиями.

Статические испытания материалов в стандартных условиях служат для их сравнительной оценки. В настоящее время методы определения, например, механических свойств при статических нагрузках значительно отличаются как в разных странах, так и в пределах одной страны. Сравнение механических свойств полимерных материалов или изделий из них, полученных при различных условиях испытания, некорректно и может привести к опасным последствиям.

Свойства пластмасс широко освещаются в многочисленных справочниках, фирменных проспектах, рекламных материалах, научных публикациях. Особенно обширную информацию по свойствам полимерных материалов дают зарубежные источники, в первую очередь, американские, немецкие, английские. В [4–16] приведено много полезных сведений по эксплуатации пластмасс, которые необходимо учитывать при изготовлении изделий из них.

Интересы потребителя и изготовителя продукции из пластмасс не совсем совпадают: потребителя, в первую очередь, интересует долговечность изделия, его цена, поведение при конкретных условиях эксплуатации; изготовитель же обращает внимание на необходимость подготовки материала перед переработкой, на технологические свойства материала и особенности его поведения при переработке. И только работа в тесном контакте между потребителем и производителем при выпуске нового изделия позволяет обеспечить необходимое качество и уменьшить затраты на его производство.

В зависимости от конкретных условий эксплуатации изделия наиболее важными могут оказаться какие-либо специфические свойства материала: например, диэлек-

трические свойства или электропроводность, поведение при долговременной эксплуатации (ползучесть, релаксация) или при повышенной температуре (коэффициент термического расширения, теплостойкость, склонность к образованию остаточных напряжений). Поэтому при выборе класса материала и его марки, оборудования, оснастки и режимов переработки необходимо ориентироваться, в первую очередь, на обеспечение этих специфических характеристик. Например, если изделие будет работать при нормальной температуре и важен только его внешний вид, то при переработке допускается повышенная вытяжка экструдата, нежелательная, если предполагается использование профиля при повышенной температуре, инициирующей проявление ориентационных напряжений, заложенных при вытяжке и охлаждении расплава.

При изготовлении изделий из прозрачных термопластов (поликарбоната, ПММА) охлаждение при калибровании должно производиться при повышенной температуре, чтобы исключить огрубление поверхности и уменьшить опасность последующего растрескивания. Более подробно специфические свойства конкретных термопластов, проявляемые при переработке и эксплуатации, рассмотрены в главах 7 и 8.

Важное значение для переработки имеют плотность и насыпная масса материала, влияющие на производительность оборудования; водопоглощение; теплофизические и реологические свойства материала; огнестойкость (пожаро- и взрывобезопасность); фрикционные свойства при различных температурах.

Определение регламентированных характеристик материалов проводят по многочисленным стандартным и специальным методикам, инструкциям и руководствам. Ниже рассмотрены некоторые методы анализа материалов, важные для переработки и оценки свойств рассматриваемых изделий.

3.2.1. Термомеханические испытания

Это один из наиболее старых видов испытаний, позволяющий оценить температурные границы эксплуатации и переработки полимерного материала. Сущность термомеханических методов заключается в определении деформируемости полимеров в широкой области температур при нагружении или отсутствии нагрузок.

Термомеханические методы позволяют определить температурные области перехода аморфных полимеров из стеклообразного в высокоэластическое состояние и далее в вязко-текучее, а также установить температуры начала деструкции. Для кристаллизующихся полимеров по резкому изменению деформируемости материала на термомеханической кривой можно оценить начало и конец диапазона плавления кристаллитов (поскольку плавление — это фазовый переход). По смещению областей фазовых переходов можно установить изменение строения или состава полимерных макромолекул, структурирование или деструкцию, пластификацию, наполнение и другие изменения химической и физической структуры полимера.

С помощью термомеханических методов можно также осуществлять производственный контроль стабильности свойств разных марок и партий промышленных полимеров.

Термомеханические кривые определяют либо при кратковременном периодическом приложении нагрузки, либо при непрерывном ее воздействии [2]. Оба метода показывают одинаковые значения температуры стеклования T_g и температуры текучести T_f , однако первый метод дает более ясную физическую картину.

Термомеханическая кривая, определяемая при периодическом воздействии на грузки, характеризует физическую деформируемость полимера при любой заданной температуре, поэтому этот метод относится к дифференциальным. Метод получения термомеханической кривой при постоянном действии нагрузки относится к интегральным методам, так как полученные данные показывают степень деформации образца за время нагрева с заданной скоростью до выбранной температуры.

Увеличение нагрузки на образец или наличие в изделии остаточных напряжений снижает значения температур переходов T_g и T_m , поэтому при оценке свойств полимеров термомеханическим методом необходимо кондиционировать и предварительно отжигать образцы для снятия остаточных напряжений.

Напротив, для оценки влияния условий переработки на свойства изделия отжиг не требуется, и по изменению положения температурных переходов на термомеханической кривой можно оценивать влияние различных технологических параметров — ориентации, наличия добавок, скорости и равномерности охлаждения. При таком методе исследования важно иметь точные приборы для получения воспроизводимых результатов.

В качестве измерительного устройства для получения термомеханических кривых применяют динамометрические весы Каргина. Испытания проводят при равномерном нагреве образца со скоростью $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Деформацию измеряют в момент прохождения системы через заданную температуру.

Вопросы приготовления образцов для термомеханического анализа, порядок выполнения экспериментов, типичные ошибки при проведении анализа, обработка и интерпретация результатов эксперимента подробно изложены в [2].

Для практических целей в заводских и исследовательских лабораториях НИИ широко используются такие приборы термического анализа, как прибор Вика. Теплостойкость по Вика определяют по ISO 306 (или по DIN 53460, ASTM D1525) на приборе, показанном на рис. 3.1 [17]. Эти испытания позволяют определить значение температуры, при которой пластмасса начинает быстро размягчаться. Круглую иглу с плоским концом (индентор), имеющую площадь поперечного сечения 1 мм^2 , вводят в соприкосновение с поверхностью испытуемого образца при определенной нагрузке, и нагревают с постоянной скоростью. За теплостойкость по Вика (VST) принимают температуру, при которой внедрение индентора составит 1 мм .

По ISO 306 допускается использование двух методов: метод А — при нагрузке 10 Н ; метод В — при нагрузке 50 Н . Скорость нагрева устанавливают на уровне 50 или $120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Результаты испытаний по ISO обозначают соответственно как A50, A120, B50 или B120. Испытательную сборку погружают в нагревательную ванну с начальной температурой $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. По истечении 5 мин прикладывают нагрузку 10 или 50 Н . Внедрение индентора контролируют индикатором с точностью до $0,01\text{ мм}$. Температуру в ванне, при которой наконечник индентора внедряется в образец на глубину $1 + 0,01\text{ мм}$, регистрируют как теплостойкость по Вика материала при выбранной нагрузке и скорости нагрева.

Вариантом определения теплостойкости по Вика является вдавливание шарика. Образец горизонтально устанавливают на опору в нагревательной камере и вдавливают в него шарик диаметром 5 мм с усилием 20 Н . Через 1 ч шарик удаляют, образец охлаждают в воде в течение 10 с и измеряют отпечаток, оставленный шариком. Если

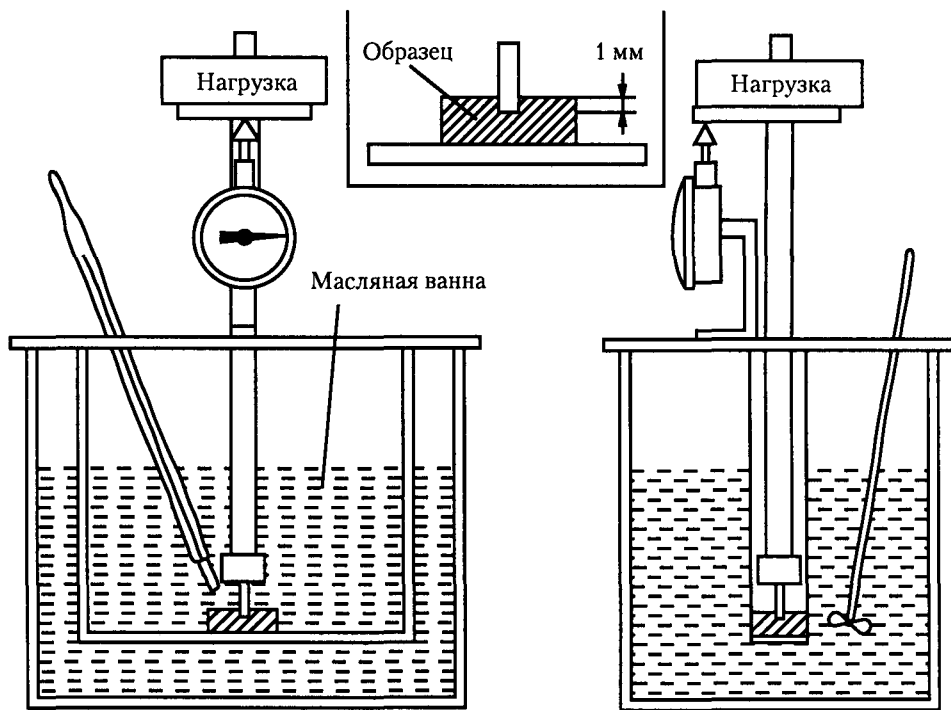


Рис. 3.1. Прибор для определения теплостойкости по Вика [17]

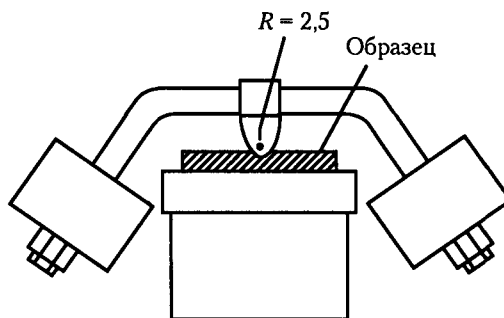


Рис. 3.2. Схема прибора для определения теплостойкости по Вика с помощью шарового индентора [17]

диаметр отпечатка менее 2 мм, то считают, что материал прошел испытания на вдавливание шарика при данной температуре. Температура испытаний может быть 75 °С для деталей, работающих без нагрузки, или 125 °С для работающих под нагрузкой. На рис. 3.2 показана схема прибора для модифицированного испытания.

Результаты определения теплостойкости по ISO и по ASTM несколько различаются. Это связано, по-видимому, с разными размерами образцов для испытания. Р

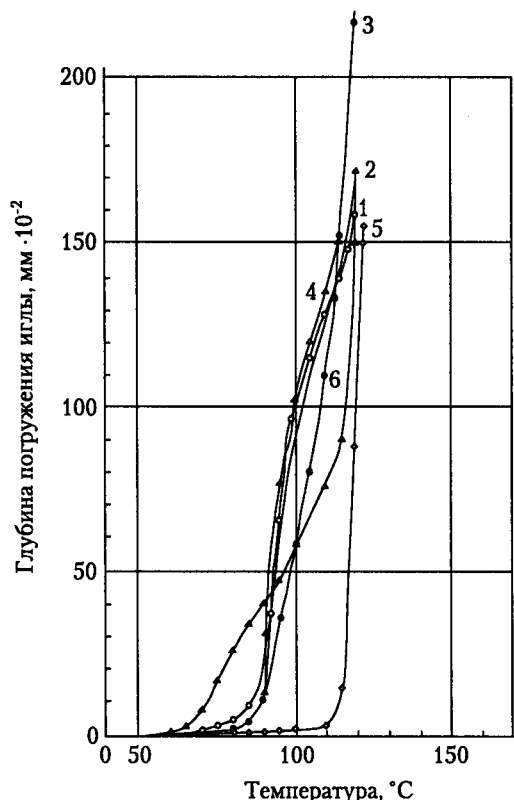


Рис. 3.3. Зависимость деформации смесей НПВХ и АБС от температуры:

1 — НПВХ марки ТН-2; 2 — ТН-2 + 5% АБС-2020; 3 — ТН-2 + 20% АБС;
4 — ТН-2 + 5% АБС + 1% VMCH (технологическая добавка); 5 — АБС-2020; 6 — НПВХ Вистан-2

зультаты по ISO немного ниже, чем по ASTM. На рис. 3.3 показаны результаты испытания ряда смесей термопластов на приборе Вика в воздушной среде при скорости нагрева 50 °C/ч.

На графиках видно, что наибольшую теплостойкость имеет чистый АБС 2020-С, а самую низкую — жесткая прозрачная марка ПВХ «Вистан-2» с оловоорганическим стабилизатором. По мере увеличения в смеси содержания АБС ее теплостойкость возрастает.

Приведенные данные наглядно характеризуют чувствительность метода испытания к изменению состава и других характеристик материала, хотя испытание в воздушной среде дает несколько завышенные результаты теплостойкости.

Другим важным видом испытания полимеров на теплостойкость является оценка деформационной теплостойкости под нагрузкой по ISO 75 (DIN 53461, ASTM D648) [17]. Деформационная теплостойкость является относительной мерой способности материала выдерживать нагрузку при повышенных температурах в течение короткого периода времени. При этих испытаниях на стандартном испытуемом образце со-

здаются определенные контактные напряжения и измеряют влияние температуры и жесткость материала при нагреве с постоянной скоростью. Для испытания используют отожженные и неотожженные образцы. При отжиге образец нагревают до определенной температуры и некоторое время выдерживают, а затем постепенно охлаждают до нормальной температуры. Такая процедура позволяет снизить или полностью удалить остаточные напряжения в образце.

При испытании по стандартам ISO и ASTM нагруженный испытуемый образец погружают в нагревательную ванну, заполненную силиконовым маслом (рис. 3.4). Создаваемые напряжения в образце могут быть низкими (0,45 МПа для методов ISO и ASTM) и высокими (1,80 МПа для метода ISO и 1,82 МПа — для ASTM). Нагрузка на образец действует в течение 5 мин, но этот период выдержки может быть опущен, если испытуемые материалы не проявляют заметной ползучести в течение первых 5 мин. По истечении 5 мин силиконовую ванну нагревают со скоростью $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

За деформацией образца ведется непрерывное наблюдение: температуру, при которой прогиб, контролируемый с помощью индикатора, достигает 0,32 мм (ISO) или 0,25 мм (ASTM), регистрируют как «деформационную теплостойкость под на

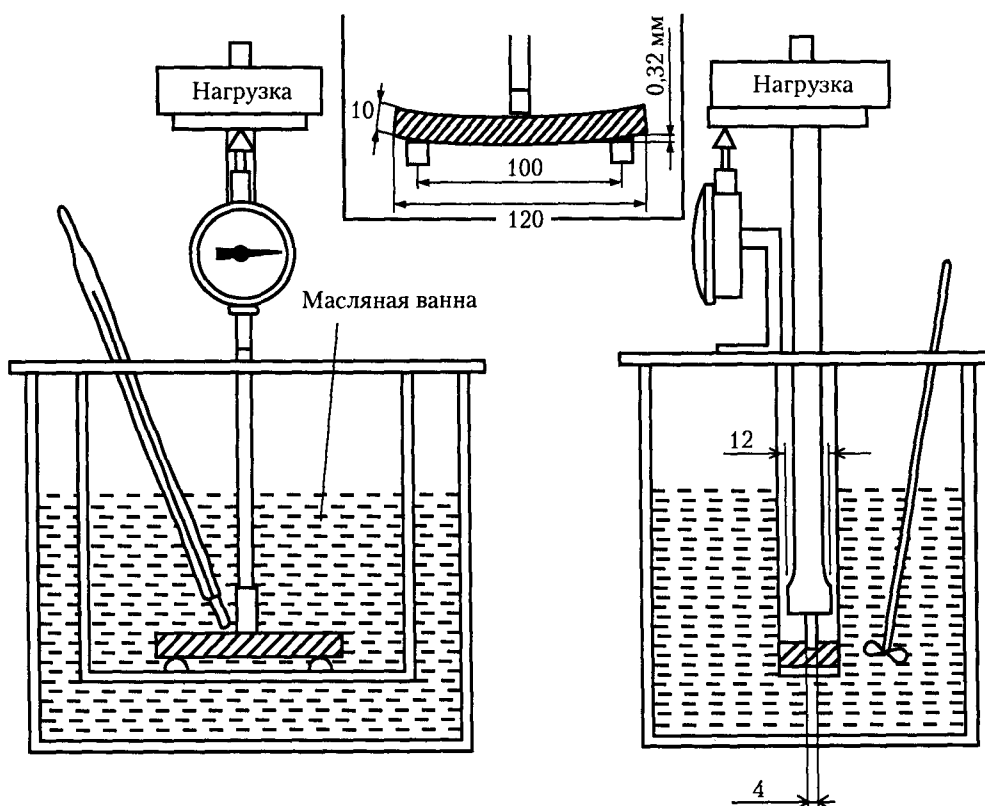


Рис. 3.4. Схема прибора для определения деформационной теплостойкости [17]

грузкой» или просто «деформационную теплостойкость» (температура тепловой деформации).

В технической литературе встречаются два вида сокращений для этого вида испытания: DTUL (деформационная теплостойкость под нагрузкой), используемое для результатов, полученных по методу ASTM, и HDT (деформационная теплостойкость или теплостойкость при изгибе) — для результатов по методу ISO. В зависимости от созданного контактного напряжения к сокращению HDT добавляют буквы А или В: HDT/А для нагрузки 1,80 МПа, HDT/В для нагрузки 0,45 МПа.

Для аморфных полимеров значения HDT примерно совпадают со значениями температуры стеклования T_c (T_g) материала.

3.2. Входной контроль сырья

Основные свойства промышленных пластмасс регламентируются действующими стандартами и техническими условиями. При отгрузке материала потребителю производитель выдает сертификат на партию сырья, в котором указаны фактические показатели материала. Если потребитель доверяет поставщику, то может направить сырье на переработку, не проводя входного контроля. При возникновении каких-либо проблем при переработке или при оценке качества изделий возможно проведение входного контроля материала по отдельным показателям: либо по указанным в сертификате, либо по характеристикам, необходимым для потребителя конкретного изделия.

3.2.1. Свойства сыпучих материалов

При приготовлении порошкообразных композиций на предприятии, производящем продукцию, рекомендуется проводить проверку качества компонентов сырья и готовой композиции.

Наиболее важными показателями порошкообразных материалов с точки зрения их переработки является сыпучесть, насыпная масса, плотность, влажность, содержание летучих веществ, склонность к слеживанию при хранении и к сводообразованию при загрузке в питающий бункер экструзионной машины [18].

Размеры и форма частиц полимера, количественное их распределение в партии сырья, молекулярная масса, способность частиц полимера совмещаться с вводимыми добавками (стабилизаторами, смазками, модификаторами) — основные показатели полимера ПВХ, по которым оценивают сырье различных производителей.

3.2.1.1. Плотность

Плотностью порошкообразных материалов называют массу единицы объема зерен без учета замкнутых в частицах пор. Плотность порошкообразных, гранулированных материалов, а также материалов в изделиях (листы, трубы, профили, отливки и пр.) определяют по ГОСТу 15139, ISO 1183, DIN 53479, ASTM D792. ГОСТ устанавливает ряд методов для определения плотности: обмер и взвешивание, гидростатическое взвешивание, пикнометрический метод, флотационный метод, метод градиентной

колонки. Выбор метода зависит от требуемой точности определения плотности. Для грубого определения плотности достаточно метода обмера и взвешивания, для точного определения плотности (до $1 \cdot 10^{-4}$ г/см³) используют метод гидростатического взвешивания с использованием аналитических весов.

Для определения плотности применяют жидкости, хорошо смачивающие полимерные материалы. Эти жидкости не должны растворять материал или поглощаться им, вступать с ним в химическую реакцию и улетучиваться во время испытания. Обычно применяют этиловый спирт, смеси метилового спирта с хлороформом или воды с хлористым цинком. При плохом смачивании образца в жидкость вводят смачивающие и обезжиривающие вещества.

В соответствии с ISO 1183, плотность можно измерить методом А для материала готовых изделий и методом В (пикнометрический метод) для порошкообразных и гранулированных материалов, а также для готовых изделий, измельченных до гранулированного состояния.

3.2.1.2. Насыпная плотность

Этот показатель характеризуется отношением массы материала к его объему и регламентируется ГОСТом 11035-93. Насыпная плотность определяется путем просыпания материала через стандартную воронку в измерительный цилиндр емкостью 100 см³. После заполнения цилиндра его взвешивают и определяют плотность насыпки по двум независимым измерениям.

3.2.1.3. Гранулометрический состав

Гранулометрический состав порошкообразных материалов определяется размером частиц и их фракционным составом. Распределение частиц по фракциям можно описать только статистическими методами с использованием седиментационного микроскопического или ситового анализов. На практике чаще применяют ситовый анализ.

Ситовый анализ используется для порошкообразных материалов с размером частиц не ниже 40 мкм. Его точность находится в пределах 0,5–1,0% и зависит от ошибки в отборе проб, износа ситовой ткани и фактических размеров ячеек сита.

Для ситового анализа обычно применяется набор почвенных сит с размерами стороны ячейки 0,25; 0,50; 1 и 2 мм. Рассеивая порошки на вибростендах с частотой 150 цикл/мин, получают фракции крупности порошков с размерами зерен 0,075; 0,250; 0,25–0,50; 0,50–1,00; 1–2 мм и выше. Порошок считается рассеянным, если при встряхивании в течение минуты через сито проходит не более 1% порошка, находящегося на сите.

3.2.1.4. Угол естественного откоса

Характеризуется величиной острого угла между образующей поверхностью свободно насыпанного порошка и горизонтальной поверхностью. Чем меньше этот угол, тем большую сыпучесть имеет порошок.

3.2.1.5. Коэффициент внутреннего трения

Характеризуется тангенсом угла естественного откоса порошкообразного материала.

3.2.1.6. Сыпучесть

Характеризуется массой порошкообразного материала, истекающего через стандартную воронку с отверстием Ø10 мм за 1 мин. Сыпучесть рассчитывают по формуле:

$$C = M/t \text{ [г/с]},$$

где M — навеска порошка, г; t — время высыпания, с.

Проводят три независимых измерения и определяют среднее арифметическое значение. Отклонение от среднего не должно превышать ± 1 г/с.

3.2.1.7. Влажность, содержание летучих веществ

Повышенное содержание в материале влаги и летучих веществ оказывает отрицательное воздействие на перерабатываемость материала и качество продукции.

Гранулированные термопласты подразделяются на поглощающие или адсорбирующие влагу и, соответственно, требующие или не требующие сушки перед переработкой. Материалы второго типа также нельзя перерабатывать сразу же после внесения из холодного склада из-за конденсации на них влаги. Перед переработкой материалы должны быть выдержаны в рабочем помещении не менее суток. Для ускорения возможности переработки негигроскопичные материалы также можно подсушить при температуре 50–60 °С. В табл. 3.3 указано, какие материалы требуют подсушки перед переработкой, а какие нет.

Газообразные продукты, содержащиеся в материале (летучие), при переработке могут вызывать образование в изделии пор, раковин и других дефектов, ухудшающих его качество. Содержание влаги и летучих в термопластах регламентируется ГОСТом 5689-95. Для порошкообразного ПВХ содержание влаги и летучих регламентируется ГОСТом 14043-94.

Таблица 3.3. Распределение термопластов по необходимости подсушки перед переработкой

Требуют подсушки	Не требуют подсушки
АБС Полиакрилаты Полиамиды Поликарбонат Полиацетали Эфиروцеллюлозные пластики Полисulfон Полиэтилентерефталат Полипропилен* Пентапласт	НПВХ Пластифицированный ПВХ ПЭНД ПЭВД Полистирол Ударопрочный полистирол ТЭПы**

* С морозостойкими добавками (каучук, акрилонитрил и др.).

** В зависимости от типа.

3.2.1.8. Миграция и летучесть пластификаторов

Изделия из пластифицированного ПВХ, эфиров целлюлозы и некоторых других термопластов содержат пластификаторы, повышающие их эластичность и морозостойкость. В качестве пластификаторов применяют высококипящие эфиры фталевой, адипиновой, фосфорной, себаценовой, дикарбоновой и других кислот, а также некоторые высокомолекулярные соединения.

С течением времени содержание пластификатора в материале уменьшается, что приводит к увеличению жесткости изделия, к его охрупчиванию. Причинами этого является летучесть пластификаторов при нормальных и особенно при повышенных температурах эксплуатации, диффузия пластификаторов при контакте с другими материалами, способность экстрагироваться жидкостями, с которыми контактирует изделие в процессе эксплуатации. Скорость и степень миграции пластификатора зависит от его типа и количества в композиции, а также от ее состава.

Важнейшим условием использования органических веществ в качестве пластификаторов является их совместимость с полимером, т. е. образование истинного раствора пластификатора в полимере. При термодинамическом сродстве пластификатора с полимером происходит молекулярное диспергирование и полимер набухает в пластификаторе. При принудительном смешении в смесителе или в экструдере пластификатор может коллоидно диспергироваться в полимере, но образующаяся эмульсия является термодинамически и агрегатно неустойчивой, что может привести к расслаиванию системы [19]. Внешне расслаивание проявляется в выпотевании (жирный налет или капельки) пластификатора на поверхности изделий.

Применение полимерных пластификаторов (например, полиэфиров адипиновой или себаценовой кислот) позволяет избежать миграции пластификаторов на поверхность изделий и экстрагирование их водой.

Используемые на практике методы оценки миграции и потери пластификаторов соответствуют рекомендации международного стандарта ISO R177-61 и ГОСТа 14926-69.

Метод определения миграции пластификаторов по ГОСТу 14926-69 заключается в оценке способности пластифицированных пластмасс изменять содержащееся в них количество пластификаторов при соприкосновении с адсорбирующими материалами и в способности отдельных пластификаторов к миграции. В качестве образцов для испытания используют прессованные диски Ø50 мм и толщиной 1 мм. Испытываемый образец помещают в термостат между двумя адсорбирующими дисками и нагружают грузом 5 кг. Стандартные условия испытания: температура 70 °С в течение 24 ч. Величину миграции пластификатора определяют по относительному изменению массы испытываемого образца.

В табл. 3.4 приведены свойства основных видов пластмасс, которые нужны как для производства изделий, так и их эксплуатации.

3.3. Технологические свойства пластмасс

К технологическим свойствам полимеров относят вязкостные и упругие свойства, проявляемые при переработке (реологические свойства), поведение при нагреве и охлаж-

Таблица 3.4. Характеристики некоторых термопластов [16]

Полимер	Насыпная плотность, г/см ³	Размер гранул, мм	Плотность при 293 К, г/см ³	Коэффициент трения по стали	Содержание влаги		Содержание летучих веществ, %	Линейная усадка, %
					%	Температура и продолжительность сушки		
ПЭВП	0,50–0,55	2 × 5	0,95	0,12	–		0,25	1,0–3,0
ПЭНП	0,50–0,55	2 × 5	0,91–0,93	0,33	–		0,10	2,0–5,0
ПП	0,40–0,50	2 × 5	0,90	–	–		0,09–0,20	1,9–2,0
ПС	0,56–0,63	3 × 5	1,05–1,08	–	0,15–0,30	T = 353 К, τ = 3–4 ч	0,05–0,80	0,4–0,8
УПС	–	2 × 5	1,04–1,06	–	0,10–0,20		0,08–0,10	0,4–1,0
АБС	0,65–0,75	–	1,04–1,05	–	0,30	T = 353 К, τ = 3–4 ч	0,10	0,3–0,7
Сополимеры стирола марок МС и МСН	–	2 × 5	1,12–1,14	–	0,10	T = 343 К, τ = 4–5 ч	0,40–0,80	1,2–2,5
ПА-6	0,65–0,75	2 × 3	1,13–1,14	0,20–0,30	0,20	T = 363 К, τ = 6–8 ч	–	1,2–1,7
ПА-610	0,60–0,70	2 × 5	1,08–1,10	0,26–0,32	0,20	T = 358 К, τ = 6–8 ч	–	0,8–1,5
ПА-12	0,50–0,60	2 × 4,5	1,01–1,02	0,28–0,30	0,12	T = 358 К, τ = 5–7 ч	0,50	0,7–1,5
ПА-66	–	–	1,13–1,14	0,15	–		–	1,7–1,8
ПК	0,65–0,70	2 × 4	1,19–1,20	0,45–0,55	0,02	T = 393 К, τ = 8–9 ч	0,20	0,6–0,8
ПФА, сополимеры	0,60–0,78	4 × 4	1,41	0,28–0,37	0,01	T = 363 К, τ = 4 ч	0,20	1,5–3,5
ПЭТФ	0,75–0,85	–	1,31–1,32	0,27	0,01	T = 383 К, τ = 5–7 ч	–	1,2–1,7 ¹ 0,5–0,7
ПБТФ	0,73–0,88	–	1,29–1,30	0,15	0,01	T = 393 К, τ = 8–9 ч	–	0,9–2,2
ПММА	0,72–0,74	–	1,27–1,31	–	0,01		–	0,2–0,6
Полисульфон	0,70–0,74	2 × 6	1,18–1,20	0,13–0,17	0,01	T = 393 К, τ = 8–10 ч	–	0,7

¹ Числитель — при температуре формования 413 К, знаменатель — при 323 К.

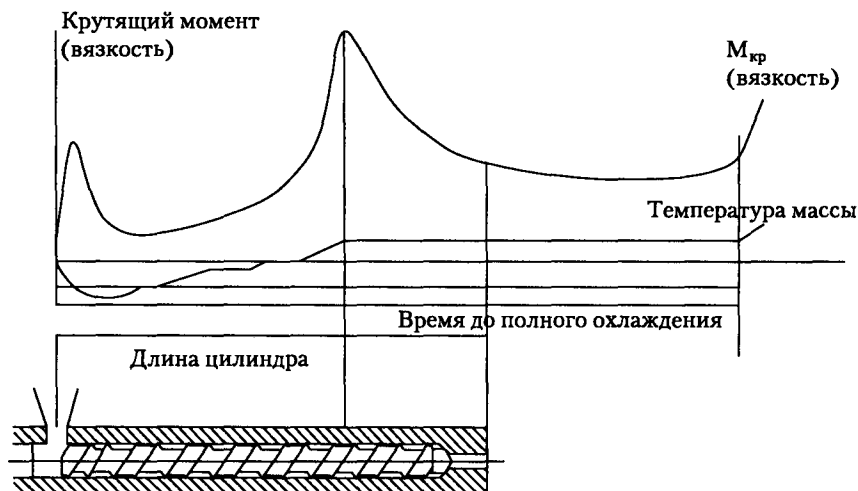


Рис. 3.5. Типичная пластограмма композиции НПВХ, полученная на приборе *Brabender*

дении, совместимость с добавками, вводимыми для изменения некоторых свойств материала (красителей, наполнителей).

Технологические свойства многих полимеров часто оценивают на приборах фирм *Brabender*, *Haake* (ФРГ) и аналогичных [20, 21]. Они позволяют оценить в близких к реальным условиям переработки характерные температурные границы плавления, пластикации и начала деструкции. На рис. 3.5 показана типичная пластограмма для поливинилхлорида, полученная на приборе *Brabender*.

С помощью экструзиометра, снабженного приборами для записи крутящего момента на шнеке, температуры и давления расплава в головке, можно оценить влияние различных добавок (смазок, типов стабилизаторов, наполнителей, модификаторов, красителей) на перерабатываемость композиций, т. е. на их технологические свойства.

3.3.1. Реологические свойства

Как уже указывалось выше, формование изделий при экструзии осуществляется путем деформирования расплава при одновременном охлаждении. Деформированию предшествует вязкое течение в каналах шнека экструдера и головки. Здесь разделение на течение и деформирование условно, так как «текут» все материалы; разница заключается только в оценке каждого из процессов (скорости, времени, величины деформации и скорости деформации течения).

Мерой сопротивления течению жидкости является ее вязкость, а деформированию — модуль упругости. Поскольку в расплаве модуль упругости пренебрежимо мал по сравнению с твердым состоянием, то и при деформировании расплава на выходе из головки имеет место течение, которое осуществляется в виде сдвига слоев расплава. Даже так называемое «продольное течение» также происходит в результате сдвига слоев, хотя вызвано не напряжениями сдвига, а нормальными напряжениями. В чистом виде существует только сдвиговое течение, продольное течение обязатель-

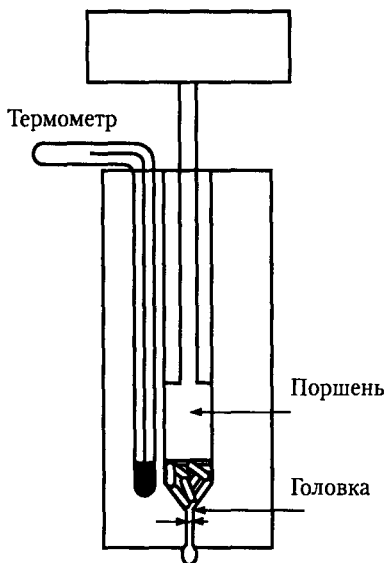


Рис. 3.6. Схема измерения индекса расплава *MFI (melt flow index)* [17]

но сопровождается сдвигом слоев. В этом смысле нет разницы между течением металлов или других пластичных сред и полимерами; разница состоит в количественной оценке предельного состояния.

Для полимеров, являющихся в большинстве случаев неньютоновскими жидкостями, вязкость, помимо температуры, зависит от параметров течения — напряжения и скорости сдвига. Графическая зависимость между скоростью и напряжением сдвига для определенной температуры представляет собой кривую течения материала. Вязкость представляет собой отношение напряжения сдвига к скорости сдвига, поэтому кривую течения для наглядности представляют также в координатах скорость сдвига — вязкость.

Вязкость характеризует реологические свойства материала в условиях сдвигового течения. На практике для экспресс-анализа вязкости материала (или его текучести) используют метод определения показателя текучести расплава (ПТР), оцениваемого на капиллярных вискозиметрах по величине расхода через стандартное сопло в течение 10 мин при стандартных условиях испытания (температуре и нагрузке). Метод стандартизован и соответствует ГОСТу 11645-73, ISO 1133, DIN 53735, ASTM D 1238.

Испытание на текучесть проводят на приборе ИИРТ, в котором навеска полимера нагревается в материальном цилиндре диаметром 9,54 мм и выдавливается поршнем через цилиндрическое сопло диаметром 2,1 мм и длиной 8 мм. Стандартные нагрузки соответствуют 2160, 5000, 10 000 и 21 600 г.

Испытания по ISO, DIN, ASTM проводят на капиллярных вискозиметрах постоянного давления или постоянного расхода, устройство которого аналогично ИИРТу. На рис. 3.6 показана схема такого прибора.

В последние 10–15 лет стали использовать новый показатель текучести расплава — объемный расход расплава или объемный индекс расплава MVI (*melt volume index*). На него распространяются стандарты ISO 1130, DIN 53735, ASTM D1238.

В стандарте DIN 53735 описаны три метода измерения течения: Метод А и Метод В, включающий, в свою очередь, две методики: Методика 1 и Методика 2.

Метод А заключается в измерении массы при выдавливании расплава полимера через стандартный капилляр. Метод В заключается в измерении перемещения поршня и плотности материала при подобных условиях [17].

По Методике 1 Метода В измеряют расстояние, на которое перемещается поршень, а по Методике 2 Метода В — время, в течение которого перемещается поршень.

Индекс течения по Методу А стандарта DIN 53735 равен скорости течения MFR по стандарту ISO 1133.

Индекс MVI определяют как объем расплава, выдавливаемый через капилляр прибора в течение 10 мин, а индекс MFI — как массу расплава, выдавливаемого через капилляр за 10 мин. Соответственно индекс MVI выражается в $\text{см}^3/10 \text{ мин}$, а индекс MFI — в $\text{г}/10 \text{ мин}$. Используемые значения температуры равны 190, 220, 250, 260, 265, 280, 300, 320 и 360 °С, масса используемых грузов — 1,2; 2,16; 3,8; 5; 10 и 21 кг. Например, обозначение MVI (250/5) означает объемный индекс течения в $\text{см}^3/10 \text{ мин}$ для испытательной температуры 250 °С и номинальной массы груза 5 кг.

Вязкость расплава определяют по DIN 54811 на капиллярном вискозиметре. Измеряют либо давление при заданных объемном расходе расплава и температуре, либо объемный расход при заданном давлении. Вязкость расплава (MV) представляет собой отношение напряжения сдвига на стенке τ к скорости сдвига на стенке $\dot{\gamma}$ и имеет размерность Па · с.

Метод определения вязкости на капиллярном вискозиметре имеет большое сходство с нормальным процессом экструзии. Для литья под давлением он может применяться ограниченно, так как скорости сдвига на вискозиметре гораздо ниже, чем при реальном процессе литья под давлением.

Американский стандарт ASTM D1238 дает рекомендации по выбору условий испытания для различных полимеров (табл. 3.5).

В табл. 3.5 отсутствует ПВХ, для которого условия определения текучести регламентируются ASTM D3364. Стандарт ASTM D3364 (1983 г.) расширяет использование метода испытания по ASTM D1238 на измерение текучести ПВХ и других реологически нестабильных материалов. Капилляры, применяемые для измерений, отличаются от капилляров по D1238 тем, что угол входа в капилляр должен быть 120°, а длина капилляра — $3d$. Дополнительно рекомендуется, чтобы точность поддержания температуры находилась в пределах $\pm 0,1$ °С. Температура цилиндра должна быть 175 °С, а нагрузка — 20 000 г; для композиций ПВХ с высокой текучестью (выше 10 г/10 мин) нагрузка составляет 5000 г. ASTM D3364 применяется для контроля текучести композиций ПВХ, имеющих широкий диапазон вязкости. Измерения проводят при скорости сдвига ниже 1 с^{-1} . Стандарт ASTM D1238 для композиций жесткого ПВХ рекомендует температуру испытания 190 °С и нагрузку 21 600 г.

Применение двух стандартов вызвано тем, что материал имеет два режима течения — с проскальзыванием (стержневое) и с прилипанием, как большинство полимеров, указанных в табл. 3.5. Граница перехода от одного режима течения к другому

Таблица 3.5. Рекомендуемые условия определения ПТР по ASTM D1238 [11]

Метод	Температура, °C	Масса груза, г	Давление, МПа	Материалы
A	125	325	0,044	ПЭ
B	125	2160	0,297	ПЭ
C	150	2160	0,297	Полиформальдегид
D	190	325	0,044	ПЭ, ЭЦ
E	190	2160	0,297	ПЭ, ЭЦ
F	190	21600	2,97	ПЭ, ЭЦ
G	200	5000	0,686	АБС, ПС
H	230	1200	0,164	ПММА, ПС
I	230	3800	0,521	ПММА, ПС
J	265	12500	1,71	Полихлортрифторэтилен
K	275	325	0,044	ПА
L	230	2160	0,297	ПА

условна и зависит от многих факторов, связанных как с составом композиций, так и с условиями нагружения расплава. Более широкие условия испытания ПВХ по двум стандартам дают более точное поведение материала при переработке.

Более подробные сведения о реологических свойствах конкретных материалов приведены в главе 7.

ПТР не дает полного представления о вязкостных свойствах расплава, так как значение ПТР представляет собой всего лишь одну точку на кривой течения. Разные материалы при определенных условиях могут иметь одно и то же значение текучести, но вести себя совсем по-разному в более широком диапазоне скоростей сдвига. Тем не менее этим показателем широко пользуются для первичной оценки материала из-за простоты определения показателя.

Большая часть промышленных термопластов в диапазоне скоростей сдвига, встречающихся при экструзии в каналах перерабатывающего оборудования и технологической оснастки, подчиняется степенному закону течения. Для большинства режимов переработки и условий производства профильных изделий этот диапазон относительно невысок и составляет $1-1000 \text{ с}^{-1}$. В этом диапазоне кривые течения в координатах $\lg \dot{\gamma} - \lg \tau$ представляют собой прямые линии с наклоном, характеризующие индексом течения n , показывающим степень отклонения от ньютоновского поведения. В более широком диапазоне скоростей сдвига кривые течения могут отклоняться от линейной зависимости, поэтому связь между скоростью сдвига и напряжением сдвига уже нельзя описать простым степенным выражением.

Было много попыток найти достаточно точные аппроксимирующие выражения, удобные для практического использования. Это уравнения Прандтля–Эйринга, Эллиса и др. Наибольшей общностью обладают полиномы n -й степени. До широкого распространения компьютерной техники и отсутствия соответствующих прикладных программ использование полиномов было ограничено, так как для определения его

коэффициентов требовалось много времени и усилий. С повышением степени полиномиального уравнивания затраты многократно возрастали.

В настоящее время имеется множество прикладных компьютерных программ, позволяющих по экспериментальным данным быстро подобрать значения коэффициентов полинома, дать им статистическую оценку и построить графики функций с оценками отклонений расчетных значений от экспериментальных данных. В [22] приводятся такие данные, полученные с помощью одной из специальных компьютерных программ.

Описание кривой течения ПЭНП полиномом

Уравнения для расчета вязкости расплава:

$$\ln \eta = \ln a + A_0 + A_1 \ln(a\gamma) + A_2 \ln^2(a\gamma) + A_3 \ln^3(a\gamma) + A_4 \ln^4(a\gamma),$$

где A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 — константы материала (табл. 3.6).

$$T = t + 273 \text{ } ^\circ\text{C}; a = b_1 \exp(b_2/T),$$

где b_1, b_2 — константы, равные $b_1 = 4,103 \cdot 10^{-7}$; $b_2 = 6,224 \cdot 10^3 \text{ K}$.

Напряжение сдвига:

$$\tau = \eta \cdot \gamma.$$

Индекс течения n :

$$1/n = 1 + A_1 + 2A_2 \ln(a\gamma) + 3A_3 \ln^2(a\gamma) + 4A_4 \ln^3(a\gamma).$$

Обозначения (табл. 3.6):

t	—	температура, $^\circ\text{C}$
T	—	абсолютная температура, K
γ	—	скорость сдвига, с^{-1}
τ	—	напряжение сдвига, $\text{H}/\text{м}^2$
η	—	вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$
n	—	индекс течения
B	—	ширина канала фильеры, мм
H	—	высота вытесняющего тела (для листовальной головки), мм
$\eta(T, p)$	—	эффективная вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$
T_s	—	стандартная температура, $^\circ\text{C}$
T_v	—	температура переработки, $^\circ\text{C}$
G	—	массовый расход, $\text{кг}/\text{ч}$
Q	—	объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$
ρ	—	плотность при температуре расплава T_v , $\text{г}/\text{см}^3$

Таблица 3.6. Значения коэффициентов полинома для ПЭНП *Lupolen* (BASF, ФРТ)

Материал	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
<i>Lupolen</i> 1840D	4,5043	−0,61739	−0,040102	0,0085704	−0,0011137
<i>Lupolen</i> 1812E	4,3059	−0,54070	−0,047000	0,0145000	−0,0020300
<i>Lupolen</i> 1810H	4,1399	−0,46350	−0,078500	0,0165000	−0,0016400
<i>Lupolen</i> 3020H	4,0766	−0,39160	0,103900	0,0159000	−0,0008520
<i>Lupolen</i> 1800M	3,6943	−0,29830	−0,097400	0,0056000	0,0010700
<i>Lupolen</i> 1811S	3,1995	−0,13430	−0,096500	−0,0010000	0,0016500

Таблица 3.7. Условия определения ПТР полимеров [16]

Полимер	Температурный интервал переработки, К	Условия определения ПТР		Температурный интервал эксплуатации, К	Энергия активации вязкого течения, кДж/моль
		нагрузка, Н	температура, К		
ПЭВП (ГОСТ 16338-85)	473–533	50,0	463	173–343	25–32
ПЭНП (ГОСТ 16337-77)	453–493	21,6	463	173–373	54–57
ПП (ГОСТ 26996-86)	463–543	21,6	503	263–363	38–46
ПС (ГОСТ 20282-86)	453–513	50,0	473	233–343	96
УПС (ОСТ 6-05-406-80)	453–503	50,0	473	233–343	73
АБС-пластик (ТУ 6-05-1587-84)	473–513	216,0	483	233–343	–
ПА-12 (ОСТ 6-05-425-86)	513–553	21,6	508	213–333	43–62
ПК (ТУ 6-05-1668-80)	523–563	21,6	553	173–393	110–126
ПФА, сополимеры формальдегида (ТУ 6-05-1543-87)	463–493	21,6	463	213–343	21–25
ПЭТФ (ТУ 6-05-1984-85)	533–543	–	–	213–443	86–107
ПБТФ (ТУ 6-05-211-1951-83)	508–533	21,6	523	233–413	71–98
ПММА (ОСТ 6-01-38-81)	463–503	125,0	463	223–363	–
ПСФ (ТУ 6-05-1969-84)	553–613	21,6	573	213–423	71–77

В исследовательских и заводских лабораториях кривые течения можно определить с помощью лабораторных экструдеров, оснащенных необходимой оснасткой датчиками и приборами для записи и регистрации экспериментальных параметров течения, специальных приборов — экструзиометров типа *Brabender*, *Haake* (ФРГ) и др.

За рубежом имеется ряд фирм, производящих лабораторное оборудование для проведения реологических исследований материалов в условиях, близких к производственным. Это экструзиометр фирмы «*Brabender*», лабораторная установка фирм «*Dobocky*», «*Dr. Cohlin*» и ряд других. Использование промышленного компьютера, которому подсоединены датчики температуры, давления расплава и расходомеры экструдера, позволяют сразу получать их графическое представление в виде кривых течения. К сожалению, такие приборы дороги.

В табл.3.7 приведены обобщенные реологические данные для отечественных материалов, применяемых для экструзии профильных изделий.

Литература

1. Козлов П. М. Применение полимерных материалов в конструкциях, работающих под нагрузкой / П. М. Козлов. — М.: Химия, 1966. — 361 с.
2. Тейтельбаум Б. Я. Термомеханический анализ полимеров / Б. Я. Тейтельбаум. — М.: Наука, 1979. — 234 с.
3. Малкин А. Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А. Я. Малкин, А. А. Аскадский, В. В. Коврига. — М.: Химия, 1978. — 330 с.
4. Молчанов Ю. М. Физические и механические свойства полиэтилена, полипропилена, полиизобутилена: Справ./ Ю. М. Молчанов. — Рига: Зинатне, 1966. — 439 с.
5. Белкин И. М. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов / И. М. Белкин, Г. В. Виноградов, А. И. Леонов; Под ред. Г. В. Виноградова. — М.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
6. Конструкционные пластмассы. Свойства и применение. / И. Хуго, И. Кабелка, И. Кожни и др.; Пер. с чешского. — М.: Машиностроение, 1969. — 336 с. — (Сер. «Библиотека конструктора»).
7. Релаксационные явления в полимерах / Под ред. Г. М. Бартенева, Ю. В. Зеленева. — М.: Химия, 1972. — 376 с.
8. Бугаков И. И. Ползучесть полимерных материалов. Теория и приложения / И. И. Бугаков. — М.: Наука, 1973. — 288 с.
9. Пивень А. Н. Теплофизические свойства полимерных материалов. Справ. / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. — Киев: Вища школа, 1976. — 179 с.
10. Теплофизические и реологические характеристики полимеров. Справ. / Под общ. ред. акад. АН УССР Ю. С. Липатова. — Киев: Наукова думка, 1977. — 244 с.
11. Малкин А. Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А. Я. Малкин, А. Е. Чалых. — М.: Химия, 1979. — 304 с.
12. Калинин Э. Л. Свойства и переработка термопластов / Э. Л. Калинин, М. Б. Саковцев. — Л.: Химия, 1983. — 288 с.
13. Калинин Э. Л. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий. Справ. пособие / Э. Л. Калинин, М. Б. Саковцева. — Л.: Химия, 1987. — 416 с.
14. Levegue A. Конструкционные пластмассы (часть 1). Сравнение аморфных и кристаллических полимеров / A. Levegue. // *Plastverarbeiter*. — 1992. — Bd. 43. — № 7. — S. 114–118.
15. Domininghaus H. *Plastics for Engineers. Materials, Properties, Applications* / H. Domininghaus. — Hanser Publishers, 1993. — 798 p.

ГЛАВА 4. ТЕЧЕНИЕ И ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИ ФОРМОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ РАСПЛАВА

4.1. Введение

Шнековая экструзия представляет собой процесс формования изделий из расплава, который можно условно разделить на три основные стадии: 1) подготовка расплава в канале шнека экструдера и подача его под давлением в экструзионную головку; 2) течение расплава по каналам сложной геометрии и выдавливание из головки в виде заготовки определенной формы; 3) пластическое деформирование и охлаждение заготовки за пределами головки и формование изделия конечной формы и размеров.

Экструдеры для переработки пластмасс относятся к машинам пластицирующего типа. Вопросы транспортирования, нагрева, плавления, смешения, нагнетания вязкой жидкости под давлением в одношнековых и двухшнековых машинах в наибольшей степени проработаны в теоретическом и практическом отношении. Имеется также большое количество прикладных работ по оптимизации конструкции шнеков при переработке различных материалов. Некоторые рекомендации по выбору шнеков при изготовлении изделий различного назначения приведены в главах 2, 7 и 8.

Течение расплава в каналах экструзионных головок является постоянным объектом внимания ученых и инженеров. Накоплен богатый теоретический и практический материал, на основе которого разрабатывают технологическую оснастку для разнообразных применений. Применение современных прикладных компьютерных программ и методов численного моделирования позволяет достаточно точно предсказывать поведение материала при конкретных условиях переработки. Но многие вопросы

практического характера изучены еще недостаточно полно или излагаются слишком сложно для практического применения.

Поведение расплава вязкоупругой жидкости на выходе из головки отличается от поведения пластических сред. Процесс формования изделия из расплава полимерного материала сопровождается изменением формы и размеров экструдата вследствие разбухания, последующей вытяжки и деформирования при калибровании. Эти процессы происходят одновременно и в неизоотермических условиях. На этой стадии поведение расплава зависит от предыстории течения в каналах шнека и экструзионной головки. Последняя стадия, называемая иногда «постформинг» (*postforming*), в наибольшей степени ответственна за качество готового изделия.

Вопросы деформирования полимерных материалов в переходном состоянии наименее изучены вследствие сложности процессов и трудности постановки корректного эксперимента. Теоретической базой для изучения могут служить многочисленные работы в области деформирования твердых материалов (пластичных металлов, керамики, глины, пищевых продуктов) и формования волокон из полимеров.

Качество конечного изделия формируется на всех стадиях технологического процесса: при подготовке материала к переработке (подсушка, предварительная окраска сырья, при необходимости — измельчение), при течении материала в каналах шнека и головки, при вытяжке, деформировании и охлаждении заготовки, при резке профиля и приемке прямолинейных отрезков или намотке в бухты.

Невозможно получить изделие с жесткими допусками на форму и размеры, если наблюдается заметное колебание расхода и давления расплава в головке, не обеспечивается необходимая точность регулирования температуры по зонам цилиндра или головки экструдера, если гранулометрический состав загружаемого в машину материала не обеспечивает равномерное питание шнека. Неправильно сконструированная в реологическом отношении экструзионная головка не сможет обеспечить равномерное выдавливание расплава по сечению формирующей щели, что на последующих стадиях формования может привести к искажению формы профиля и его искривлению по длине. Неравномерность обжатия участков профиля при калибровании или неодинаковые условия охлаждения создают проблемы при получении изделия требуемой формы. Невысокая прочность расплава затрудняет вытяжку экструдата при наладке процесса.

Невозможно перечислить все многочисленные технические проблемы, возникающие на стадии отработки технологического процесса. Кроме них существуют еще и организационные, например, состояние оборудования, квалификация операторов экструзионных машин и технологов, марочный состав сырья и его качество, подготовка сырья перед переработкой. Многие вопросы техники и организации производства тесно переплетаются, так что их нельзя отнести к чисто техническим или организационным.

В настоящей главе рассмотрены некоторые вопросы формования изделий из расплава, которые оказывают влияние на конструирование и расчет технологической оснастки и технологию производства профильных изделий. Прежде всего это вопросы течения расплавов в каналах различной геометрии, разбухание и вытяжка расплава, деформирование заготовки сложного поперечного сечения при вытяжке и различных схемах нагружения.

Сложность протекаемых на этих стадиях процессов в большинстве случаев не позволяет рекомендовать удобные для практического использования выражения. Поэтому важны эмпирические или полуэмпирические зависимости и рекомендации основанные на практическом опыте переработки различных пластмасс.

4.2. Подача расплава в экструзионную головку

В каналах шнека экструзионной машины материал нагревается, плавится, гомогенизируется и под давлением подается в экструзионную головку. Уровень развиваемого шнеком (в двухшнековых экструдерах — шнеками) давления зависит от его конструкции, скорости вращения, агрегатного состояния загружаемого в машину материала и вязкости расплава. В экструдерах со шнеками классического типа давление степенно повышается к концу шнека и достигает максимального значения на входе в головку. В машинах с рифленной загрузочной втулкой пик давления наблюдается на конце втулки, на входе в головку давление меньше, его величина зависит от многих факторов: конструкции шнека, теплофизических и реологических свойств материала, установленных технологических параметров процесса. В машинах с дегазационным материалом шнек имеет более сложную геометрию по сравнению с традиционным трехзонным шнеком, поэтому характер изменения давления по его длине также более сложен.

Уровень развиваемого шнеком давления зависит также от мощности приводного двигателя. С развитием и совершенствованием конструкций экструзионных машин мощность привода все время повышалась. Характеристики некоторых видов экструдеров и используемых для переработки различных термопластов шнеков приведены в главах 2, 7 и 8.

4.3. Течение в головке и формирование «заготовки»

Подаваемый в головку однородный расплав формирует при течении по каналам головки «заготовку», из которой в дальнейшем получают изделие. В отличие от предыдущих процессов (например, прессования алюминиевых профилей из предварительно полученных пластичных заготовок) при формировании изделий из расплава методом шнековой экструзии заготовка создается непрерывно, и от ее свойств зависит качество изделия.

Головка представляет собой многосвязный канал, состоящий из последовательных участков различной формы и размеров. При течении макромолекулы полимера подвергаются сдвигу и растяжению. Развитие течения характеризуется скоростью деформации сдвига, при сдвиге слоев возникают напряжения сдвига. Соотношение между напряжением сдвига и скоростью сдвига представляет собой меру сопротивления течению — вязкость жидкости. В канале постоянного сечения течение жидкости имеет сдвиговый характер, при изменении размеров возникает продольный компонент скорости и соответствующие ей нормальные напряжения. В чистом виде растяжение в канале может проявляться только по оси канала при отсутствии сдвига слоев.

Напряженное и деформированное состояние жидкости при течении в общем случае характеризуется тензорными величинами [1–4]. Вязкость жидкости является скалярной величиной и в общем случае зависит от всех компонентов тензоров скорости деформации и напряжения. При объемном деформировании в каналах переменного сечения все девять компонентов тензорной характеристики течения могут иметь ненулевое значение, поэтому строгое описание процессов течения проблематично даже для простых в реологическом отношении сред. В связи с этим для инженерных целей используют интегральные характеристики течения. К ним относятся объемный расход и перепад давления по длине канала. Течение всех вязких жидкостей подчиняется законам гидравлики, специфические свойства жидкости определяют лишь количественные соотношения между параметрами течения и их реологическую связь.

Вязкость полимерных расплавов не является постоянной величиной, а зависит от скорости деформации и температуры, поэтому оценку этой характеристики проводят в широком диапазоне скоростей деформации и температур. Проще всего это сделать в условиях стационарного сдвигового течения на капиллярных приборах, процессы течения в которых близки к реальным процессам в рабочих органах перерабатывающего оборудования. Способы оценки вязкости (или текучести) полимерных расплавов рассматриваются в главе 3. Получаемые на таких приборах «кривые течения» используют для нахождения значений вязкости для конкретных условий течения. Хотя значение этой величины может отличаться от реального значения меры сопротивления течению, других способов определения «объемной» вязкости пока не существует.

Интегральная связь между объемным расходом и перепадом давления в канале имеет вид:

$$\Delta P = WQ\eta, \quad (4.1)$$

где W — гидравлическое сопротивление канала; η — эффективная вязкость расплава.

Для псевдопластичных неньютоновских жидкостей, подчиняющихся степенному закону течения, эту связь представляют в виде выражения [5–10]:

$$Q = A \Delta P^n, \quad (4.2)$$

где A — коэффициент пропорциональности, зависящий от вязкости полимера и геометрии канала; n — индекс течения, характеризующий степень отклонения от ньютоновского характера течения (для чисто вязкой жидкости $n = 1$, а профиль распределения скоростей по поперечному сечению канала имеет вид параболы; при $n = 0$ течение представляет собой поступательное движение стержня без сдвига слоев — «стержневое» течение).

Описанию связи между параметрами течения посвящено большинство работ, в которых рассматриваются экструзионные головки. В табл. 4.1 приведены формулы для расчета перепада давления в каналах различной формы, которые составляют в большинстве случаев многосвязный канал экструзионных головок [11]. Подобные формулы приводятся также в [10, 12] и других многочисленных публикациях, посвященных экструзионным головкам.

4.4. Деформирование экструдата на выходе из экструзионной головки

4.4.1. Разбухание экструдата

По сравнению с формированием изделий из других пластичных сред (металлов, пищевых масс) для полимеров характерно проявление замедленной упругости распла (высокоэластичности), проявляющейся в разбухании экструдата на выходе из головки и искажении его формы и размеров. Особенно заметно это проявляется при изготовлении изделий сложного поперечного сечения. Связано это с тем, что при течении вязкоупругих жидкостей по каналам различной формы в результате сдвига слоев растяжения макромолекул происходит накопление и релаксация высокоэластических деформаций. Эти конкурирующие процессы происходят непрерывно и одновременно, преобладание того или иного процесса зависит от геометрии канала, скорости и температуры экструзии.

В состав экструзионных головок всегда входит формующий инструмент (фильера), который обычно имеет участок с постоянными размерами поперечного сечения. Длина этого участка выбирается в целях «успокоения» расплава и обеспечения релаксации накопленных при течении напряжений и обратимых деформаций.

Период релаксации зависит от предыстории течения и температуры и не является постоянной величиной. Для описания поведения вязкоупругих жидкостей используют понятие «характерного времени релаксации», представляющего собой время течения которого начальное напряжение (или обратимая деформация) снижается до условно-равновесного состояния, соответствующего заданной скорости сдвига и температуре [1, 2]. Полагают, что при равновесной деформации течение имеет чисто сдвиговый характер.

Если характерное время релаксации больше времени течения расплава в формующем канале, то стационарное состояние не достигается и релаксация продолжается на выходе из канала. Устранить полностью разбухание экструдата невозможно даже при течении в очень «длинных» каналах, так как запасенная упругая энергия в расплаве не единственная причина разбухания. Перестройка профиля скоростей от параболического к плоскому (стержневому) на выходе из головки также вносит свой вклад в увеличение поперечного сечения струи, хотя вклад этого явления в разбухание невелик и не превышает 10–20% [13, 14]. На рис. 4.1 показана типичная схема формирования струи расплава на выходе из головки и развиваемые по зонам скорости деформации и напряжения [15].

Форма струи расплава и положение максимального размера зависит от степени вытяжки и реологических свойств материала. При отсутствии вытяжки сечение максимальными размерами находится на наиболее удаленном расстоянии от фильеры, с увеличением вытяжки это сечение приближается к фильере, а поперечные размеры его уменьшаются. Для расплавов с высокой адгезией к металлу уменьшение поперечных размеров струи при высокой вытяжке начинается непосредственно сечения фильеры на выходе, при этом максимум размеров вырождается. Для расплавов с плохой адгезией к металлу может наблюдаться вытяжка из отверстия фильеры, сокращающая эффективную длину формующего участка [16].

Таблица 4.1. Формулы для расчета перепада давления в каналах различной геометрической формы [11]

Форма канала	Перепад давления, Δp , кгс/см ²
Произвольная форма с параллельными сторонами	$\Delta p = \eta L Q^n f(n, \xi) X^{-(3n+1)}$
Произвольная форма с последовательно сужающимися сторонами	$\Delta p = \eta \text{ctg} \theta Q^n f(n, \xi) (X_2^{-3n} - X_1^{-3n})$
Прямоугольный канал постоянного сечения	$\Delta p = 2L \eta \left(Q \frac{4n+2}{n} \right)^n B^{-n} h^{(1-2n)}$
Сужающийся прямоугольный канал постоянной ширины	$\Delta p = \eta \frac{\text{ctg} \theta}{2n} \left(Q \frac{4n+2}{n} \right)^n B^{-n} (h_2^{-2n} - h_1^{-2n})$
Клиновидный прямоугольный канал с $B/h = \text{const}$	$\Delta p = \eta \frac{\text{ctg} \theta}{3n} \left(Q \frac{4n+2}{n} \right)^n \xi^{-n} (h_2^{-3n} - h_1^{-3n})$
Равносторонняя призма постоянного сечения, N – число сторон	$\Delta p = 2\eta L \left(Q \frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \left(\frac{N}{\pi} \text{tg} \frac{\pi}{N} \right)^{n/2} R^{-(3n+1)}$ $R = \frac{s}{2} \left(\frac{N}{\pi} \text{ctg} \frac{\pi}{N} \right)^{1/2}$
Сужающийся канал в виде равностороннего многоугольника с N сторонами	$\Delta p = \frac{2\eta \text{ctg} \theta}{3n} \left(Q \frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \left(\frac{N}{\pi} \text{tg} \frac{\pi}{N} \right)^{n/2} (R_2^{-3n} - R_1^{-3n})$
Эллиптический канал постоянного поперечного сечения, $B_{\text{эл}}$ – большая ось эллипса	$\Delta p = \eta L (\xi + 1) \xi^{-(n+1)} \left(\frac{Q}{\pi^{3/2}} \frac{4n+2}{n} \right)^n B_{\text{эл}}^{-(3n+1)}$
Сужающийся эллиптический канал	$\Delta p = \eta \frac{\text{ctg} \theta}{3n} (\xi + 1) \xi^{-(n+1)} \left(\frac{Q}{\pi^{3/2}} \frac{4n+2}{n} \right)^n (B_{\text{эл}}^{-3n} - B_{\text{эл}}^{-3n})$
Цилиндрический канал постоянного сечения, $d = \text{const}$	$\Delta p = 2\eta L \left(Q \frac{3n+1}{\pi n} \right)^n R^{-(3n+1)}$
Усеченный круговой конус, $d = \text{var}$	$\Delta p = \frac{2\eta \text{ctg} \theta}{3n} \left(Q \frac{3n+1}{\pi n} \right)^n (R_2^{-3n} - R_1^{-3n})$

Разбуханию полимерных материалов посвящено большое количество теоретических и прикладных работ. Наибольший интерес для практического использования представляют те работы, в которых рассматривается изменение высокоэластической деформации по длине экструзионной головки в зависимости от реологических свойств материала и технологических режимов экструзии, а также дается математическое описание развивающихся процессов [2, 10, 17, 18]. Это позволяет конструировать каналы экструзионных головок на основе выбранного критерия.

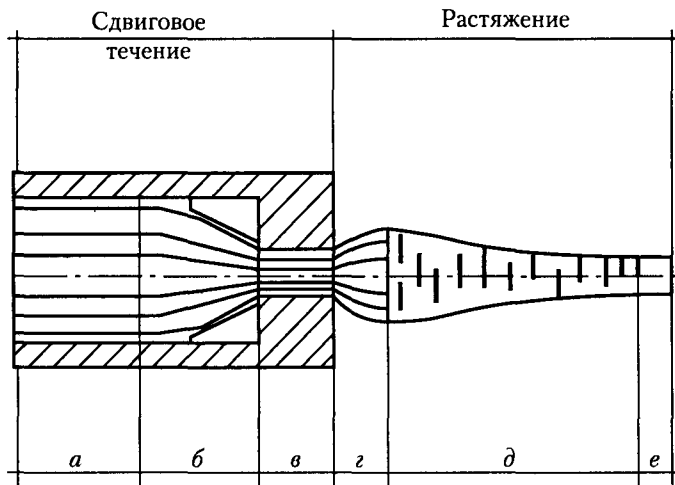


Рис. 4.1. Зоны с различными режимами течения при выдавливании расплава полимера из капилляра [15]:

а — зона низких скоростей сдвига; *б* — переходная зона ускорения; *в* — зона высоких скоростей сдвига в капилляре; *г* — зона упругого восстановления, соответствующая переходу от напряжений сдвига к растяжению экструдата; *д* — зона растяжения экструдата; *е* — зона отсутствия деформаций

На рис. 4.2 показан характер развития и релаксации высокоэластических деформаций в каналах экструзионных головок, который иллюстрирует высказанное выше утверждение о непрерывности процесса развития и релаксации обратимых деформаций и их зависимости от конкретных условий течения.

Каждой скорости деформации соответствует значение полной деформации и ее обратимой части. Хотя обратимая часть также изменяется во времени, при малом приращении Δt этим можно пренебречь и полагать, что высокоэластическая деформация зависит только от скорости деформации. Релаксация же обратимой деформации развивается во времени и связана со скоростью деформации сдвига или растяжения, температурой расплава и другими параметрами течения.

Таким образом, от времени релаксации зависит величина остаточной обратимой деформации. С уменьшением времени значение обратимой деформации возрастает, и в пределе должно стремиться к значению полной деформации, т. е. жидкость будет вести себя подобно твердому упругому телу. Поэтому изучение течения расплавов через короткие каналы представляет интерес не только с практической точки зрения, поскольку они присутствуют в головках для формирования волокон и армированных шлангов, в фильтрах расплава, но также для определения предельных значений высокоэластических деформаций, развивающихся при заданных условиях течения.

Результаты работ по изучению течения расплавов полимеров через короткие каналы и при высоких скоростях экструзии [19–26] позволяют сформулировать рекомендации по конструированию зоны входа в формирующий канал при высокоскоростной экструзии, а также установить значения обратимой деформации полимера при $t \rightarrow 0$.

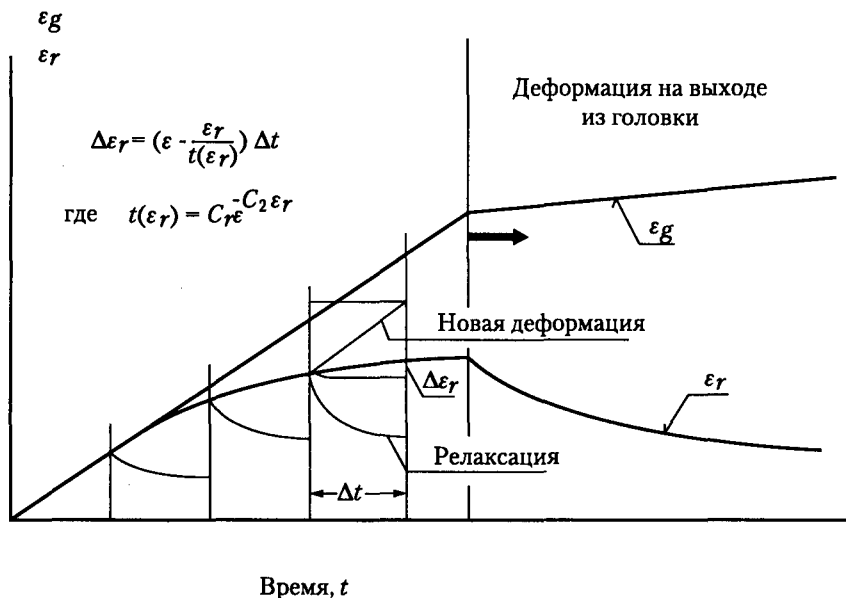


Рис. 4.2. Развитие и релаксация обратимой высокоэластической деформации при течении расплава в экструзионной головке [17]:

ε_g — полная деформация; ε_r — обратимая деформация

В работе [14] сделан краткий обзор причин разбухания и констатируется, что точное предсказание величины разбухания на основе имеющихся теорий пока невозможно, поскольку влияние ряда факторов (например, молекулярных характеристик материала) остается еще неясным.

Таким образом, остаточная высокоэластическая деформация на выходе расплава из головки определяется уровнем начальных напряжений и деформаций на входе в формующий канал, скоростью и временем их релаксации. Это позволяет конструктивно и технологически организовывать течение в головке таким образом, чтобы свести в нем к минимуму уровень релаксирующих напряжений и деформаций перед входом в формующий канал.

Из-за искажения формы и размеров экструдата высокоэластическая деформация и разбухание экструдата относятся к нежелательным эффектам, но они повышают прочность расплава при сдвиговом течении и растяжении, что облегчает его вытяжку при наладке процесса формования изделия.

При течении расплава по каналам с резким изменением формы (например, ступенчатые каналы, резкое изменение наклона образующих канала) возникают вторичные циркуляционные потоки, образующие в головках упругие зоны, характер и интенсивность которых определяется природой полимерного материала и режимом течения. Вторичные циркуляционные течения связывают с высокоэластичностью и режимом течения [15, 19–21, 25].

Высокие скорости современного оборудования и широкий ассортимент промышленных пластмасс требуют использования оптимальных конструкций головок, учи-

тывающих особенности реологического поведения полимера, в частности проявление расплавом высокоэластичности и ее влияние на изменение формы, размеров и свойств изделия.

4.4.2. Неизотермическая вытяжка расплава

Формование изделий из расплава, как правило, сопровождается продольной вытяжкой, величина которой зависит от способа формования изделия, реологических свойств материала, режимов деформирования. Например, при производстве моноволокон величина вытяжки может достигать десятков и сотен процентов, при изготовлении рукавной пленки продольная вытяжка сопровождается поперечным раздувом рукава под действием подаваемого внутрь него воздуха; при получении профильных изделий значение продольной вытяжки относительно невелико. Высокое значение вытяжки расплава возможно вследствие наличия у полимера высокоэластических свойств, которые обеспечивают расплаву определенную прочность. Чем более пластичен материал, тем меньше у него составляющая высокоэластичности.

Изучение продольных деформаций эластичных жидкостей началось еще в 30-х гг. XX в. Первые работы были в основном посвящены оценке «прядомости» расплавов, т. е. их волокнообразующих свойств. Опубликовано огромное число работ теоретического и прикладного характера по растяжению растворов и расплавов самых различных полимеров. Эти работы посвящены в основном изучению реологических свойств полимеров в условиях изотермического или неизотермического продольного деформирования при различных режимах нагружения (например, при постоянной скорости продольной деформации, при постоянной приложенной силе или при постоянной скорости растяжения).

Форма струи расплава, показанная на рис. 4.1, относится как к изотермическому, так и неизотермическому процессам; различия определяются скоростью деформирования и начальной температурой расплава. Связывать прекращение продольной деформации при изотермическом растяжении только с величиной вязкости, видимо, нельзя, так как если даже значение продольной вязкости в 3 и более раз превышает вязкость при сдвиговом течении, прекращение продольного течения маловероятно. По-видимому, здесь проявляется влияние упругих свойств расплава и значения модуля упругости (эластичности). В неизотермических условиях этот процесс упрочнения протекает гораздо быстрее, поэтому длина зоны вытяжки струи значительно сокращается.

Попытки описать форму струи предпринимались неоднократно, главным образом при исследовании волокнообразующих свойств полимеров и изучении продольных течений. Динамику прядомости расплавов обычно анализируют с помощью одновременного рассмотрения системы дифференциальных уравнений в частных производных, включающей уравнения неразрывности, баланса сил и теплового баланса, а также реологическое уравнение течения [27–29]. Связь между размерами струи и скоростью растяжения описывается уравнением материального баланса, общий вид которого включает в качестве независимого параметра время:

$$F \rho \frac{\partial V}{\partial z} + FV \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho V \frac{\partial F}{\partial z} = - \left(F \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial F}{\partial \tau} \right), \quad (4.3)$$

где F , V , ρ — текущие значения площади поперечного сечения, скорости и плотности расплава в произвольном по длине сечении струи соответственно.

В таком виде уравнение позволяет анализировать нестационарные процессы продольной деформации жидкостей.

Дифференциальное уравнение (4.3) получено при анализе формирования струи круглого сечения при следующих допущениях: 1) поперечное сечение струи остается круглым в любом месте по длине зоны деформирования; 2) теплопередача в осевом направлении незначительна и ею можно пренебречь; 3) поперечный градиент температуры по радиусу струи отсутствует; 4) продольная вязкость жидкости в измеряемом по длине сечении зависит только от температуры; 5) высокоэластическая деформация струи незначительна по сравнению с вязким течением.

В [28, 29] отмечается, что пока не существует строгих методов определения размеров экструдата в зоне вытяжки даже для струи круглого сечения, поэтому изучение этого вопроса продолжается экспериментальными методами.

Принцип формирования струи некруглого сечения (например, прямоугольного) аналогичен. Отличие состоит в объемном характере деформаций и одновременном изменении ширины и толщины экструдата. Этот случай деформирования является общим и реализуется при формировании профильных изделий, труб, листов и других изделий, поэтому некоторые особенности формирования струи некруглого сечения рассмотрим более подробно.

4.4.3. Основные характеристики деформирования расплава полимера

Оценку состояния материалов, в частности полимеров, чаще всего проводят путем изучения их деформации. За характеристику состояния полимерного тела принимают величину деформации, развившейся за определенное время при заданных температуре и уровне напряжения.

Для характеристики деформаций используют различные величины в зависимости от уровня деформаций. При малых упругих деформациях чаще пользуются относительным изменением размеров деформируемого тела по отношению к начальному состоянию, например:

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} \times 100\%. \quad (4.4)$$

При относительно больших деформациях удобнее применять относительные величины или коэффициенты деформации. Например, для объемного тела в виде прямоугольника или куба это коэффициент удлинения (вытяжки) $\lambda = l_k / l_0$; коэффициент обжатия (восстановления) по толщине $\gamma = h_k / h_0$; коэффициент уширения (сужения) по ширине $\beta = b_k / b_0$.

В зависимости от величины конечных размеров по отношению к начальным коэффициенты деформации могут быть как больше единицы, так и меньше.

При больших деформациях для оценки текущего состояния деформируемого тела применяют интегральные логарифмические деформации (мера Генки):

- продольная деформация (в направлении продольной оси z):

$$\varepsilon_z = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0};$$

- поперечная деформация по ширине (по оси x):

$$\varepsilon_x = \int_{b_0}^{b_k} \frac{db}{b} = \ln \frac{b_k}{b_0};$$

- поперечная деформация по высоте (толщине) (по оси y):

$$\varepsilon_y = \int_{h_0}^{h_k} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_k}{h_0}.$$

При формировании изделий из расплава, когда материал находится в вязкотекучем состоянии, общая деформация полимерного тела в любой момент времени складывается из обратимых мгновенно-упругой и запаздывающей упругости, развивающейся во времени, и необратимой пластической деформации.

При деформировании элемента конечных размеров, например, экструдата при формировании изделия, напряжения и деформации неравномерно распределяются по поперечному сечению. В механике сплошной среды различают понятия однородного и неоднородного напряженного состояния, однородной и неоднородной деформации. Под однородным понимают такое напряженное или деформированное состояние деформируемой среды (тела), когда во всех ее точках напряжения и деформации одинаковы. Если это условие не выполняется и ограниченные объемы деформируемой среды испытывают различные напряжения или деформации, то говорят о неоднородном напряженном или деформированном состоянии. Однако всегда представляется возможным рассматривать процесс деформирования состоящим из множества элементарных актов деформации, при которых напряженное и деформированное состояние с некоторым допущением можно считать однородным [30].

Когда коэффициенты деформации применяют для оценки изменения размеров конкретного изделия, предполагается, что деформации по соответствующему направлению однородны, в связи с чем производятся вычисления со средними деформациями.

При изотермической деформации пластически деформируемых сред соблюдается принцип несжимаемости и постоянства объема, который для главных направлений (в направлении координатных осей) представляет собой выражения:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (4.6)$$

или

$$\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = 0.$$

Здесь первое выражение предназначено для главных деформаций, второе — для компонентов главных скоростей деформации.

Важным показателем деформации, которым широко пользуются в теории обработки металлов давлением, является смещенный объем. Смещенным объемом по соответствующему направлению называют интегральную сумму элементарных объемов материала за время деформирования [31].

Обычно различают объемы, смещенные в направлении главных осей деформации. Это смещенные объемы в направлении продольной оси и двух поперечных. Их представляют соответствующими выражениями:

$$V_x = V \ln \frac{b_k}{b_0}; \quad V_y = V \ln \frac{h_k}{h_0}; \quad V_z = V \ln \frac{l_k}{l_0}, \quad (4.7)$$

где V — объем деформируемого тела; индекс k относится к конечным размерам, индекс 0 — к начальным.

Из выражений (4.7) следует, что логарифмические деформации в направлении осей z , x и y представляют собой отношения соответствующих смещенных объемов к объему деформируемого тела.

4.4.3.1. Зоны деформации

При деформировании различных материалов для обозначения характеристик формоизменения вводят понятия очага, зоны или участка деформирования. Геометрическим очагом деформации называют участок, на котором материал подвергается непосредственному воздействию рабочих органов машины или инструмента, осуществляющих пластическое деформирование. Например, при волочении металлической проволоки очагом деформации является волока, при прессовании профиля из заготовки — цилиндр с формирующим отверстием, при прокатке металлического профиля — зона контакта металла с валками прокатного стана и т. д.

Часто геометрический очаг деформации называют также контактной зоной деформации. Развитие деформации может наблюдаться и за пределами контактной зоны, вне пределов непосредственного воздействия деформирующего инструмента. Зоны деформации, прилегающие к контактным, называются внеконтактными. Протяженность внеконтактных зон определяется сопротивлением материала деформированию.

При деформировании расплавов полимеров их формоизменение может происходить и без непосредственного контакта с рабочими органами машины или инструмента. Например, при формовании волокон, некоторых видов профильных изделий из резиноподобных материалов к экструдату приложено продольное усилие, под действием которого происходит изменение формы и размеров экструдата с образовани-

ем конечного продукта. При этом на материал также оказывается воздействие, но не через контакт с инструментом, а через рабочие параметры процесса. Аналогичное воздействие может быть и при деформировании пластически деформируемых металлических материалов, например, при правке прессуемых (экструдированных) профилей из алюминиевых или магниевых сплавов за счет некоторой продольной вытяжки; однако в отличие от полимеров для металлов такое деформирование является вспомогательной операцией.

При формировании изделий из расплавов полимеров большое значение имеют внеконтактные зоны деформации, поскольку в них развиваются как необходимые пластические деформации, вызывающие изменение формы и размеров экструдата, так и обратимые высокоэластические деформации, которые могут являться причиной искажения формы или образования в изделии остаточных напряжений.

Совокупность контактной зоны с внеконтактными образует фактическую зону деформирования, в которой происходит формоизменение материала. Протяженность фактической зоны деформирования тем выше, чем больше деформации и чем выше сопротивление материала деформированию.

Длина фактической зоны деформирования может оцениваться в абсолютных единицах (например, длина участка вытяжки или длина волокна) или в относительных единицах (например, отношение длины формирующего участка к его высоте для экструзионных головок).

4.4.3.2. Схемы деформирования

Из условия постоянства объема при изотермической деформации максимальная главная деформация, согласно выражению (4.6), равна сумме двух других, взятых с обратным знаком. В механике сплошных сред рассматривают три вида схем главных деформаций — две объемных и одна плоская:

- с одной положительной и двумя отрицательными деформациями;
- с двумя положительными и одной отрицательной деформацией;
- с одной деформацией равной нулю и двумя другими равными по величине и противоположными по знаку.

На рис. 4.3 показаны объемные схемы растяжения (1), сжатия (3) и плоской деформации сдвига (2), когда одна из главных деформаций равна нулю. При этом положительной считают деформацию растяжения, отрицательной — деформацию сжатия. По величине деформации располагаются в порядке убывания с учетом знака деформации:

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3.$$

При одноосном растяжении продольная деформация становится главной деформацией ε_1 , а деформации уменьшения размеров по ширине и толщине (сжатие) — соответственно ε_2 и ε_3 в зависимости от величины сокращения. При этом обе деформации ε_2 и ε_3 отрицательны, максимальная по абсолютной величине становится, учитывая знак, минимальной главной деформацией ε_3 . Наоборот, при выходе расплава из головки происходит сокращение продольного размера элементарного деформиру-

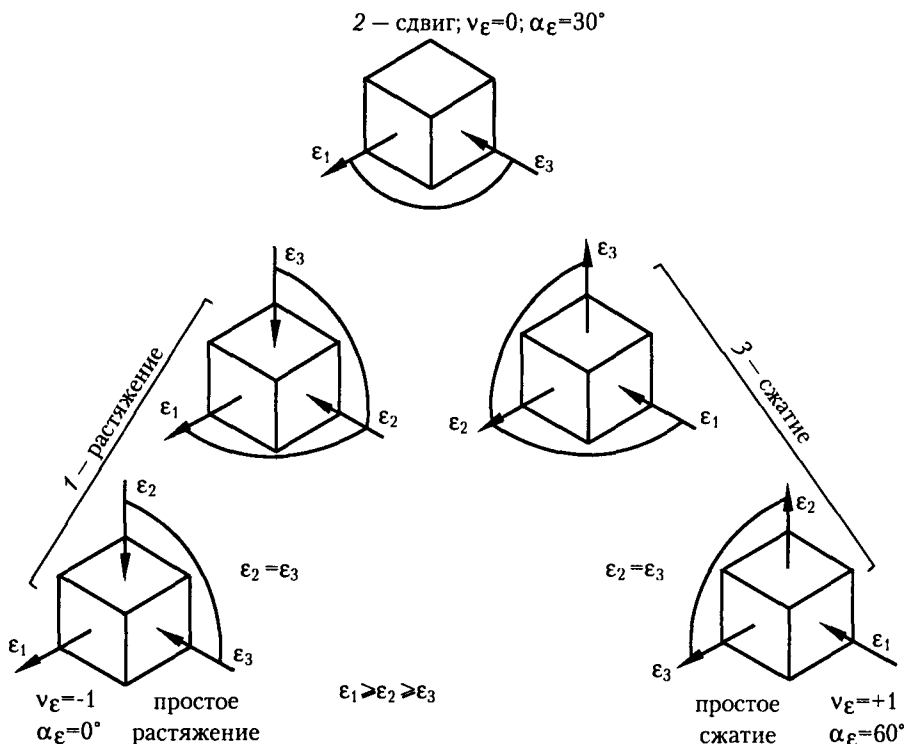


Рис. 4.3. Механическая схема деформаций сплошной среды [30]:

ν_{ε} — коэффициент деформированного состояния; α_{ε} — угол вида деформации

емого объема и увеличение поперечных. В большинстве случаев большему изменению подвергается толщина стенки, за ней — ширина полосы; отрицательная деформация сокращения длины максимальна по абсолютной величине и минимальна с учетом знака. Если за продольное направление принять ось z , по толщине стенки — ось y и по ширине — ось x , то в последнем случае главные деформации будут располагаться в таком порядке:

$$\varepsilon_y > \varepsilon_x > \varepsilon_z.$$

Механические схемы деформирования поясняют действие внешних сил и отражают характер формообразования.

4.4.3.3. Соотношение продольных и поперечных деформаций

Соотношение поперечных и продольных деформаций изотропных тел в упругой области определяется с помощью коэффициента Пуассона, который для этих условий является постоянной величиной.

В общем случае, когда рассматривается деформация анизотропных тел и когда поперечные деформации различны по величине и знаку, их связь с продольной деформацией устанавливается соотношениями:

$$\epsilon_2 = -\nu_{21}\epsilon_1; \quad (4.8 \text{ а})$$

$$\epsilon_3 = -\nu_{31}\epsilon_1, \quad (4.8 \text{ б})$$

где ϵ_1 — наибольшая главная деформация; ϵ_2 — средняя по величине (с учетом знака) главная деформация; ϵ_3 — минимальная главная деформация.

Коэффициенты ν_{21} и ν_{31} устанавливают связь между поперечной и продольной главными деформациями; их называют коэффициентами поперечной деформации. Первый нижний индекс коэффициента относится к значению главной деформации с учетом знака.

Из выражения (4.8) можно установить связь между поперечными деформациями ϵ_2 и ϵ_3 :

$$\frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} = \frac{\nu_{31}}{\nu_{21}} = \nu_{32}. \quad (4.9)$$

4.4.3.4. Степень вытяжки

Для формования изделий из расплава показатель степени вытяжки является одним из основных. Степень вытяжки определяют как отношение длин растянутого и начального элемента. При пластическом изотермическом деформировании объем остается постоянным:

$$V = V_k = V_0 \quad \text{или} \quad b_k h_k l_k = b_0 h_0 l_0. \quad (4.10)$$

Из последнего равенства получаем:

$$\frac{l_k}{l_0} = \frac{b_0 h_0}{b_k h_k} = \frac{F_0}{F_k} = \lambda, \quad (4.11)$$

т. е. степень вытяжки определяется как отношение площадей поперечного сечения деформируемого тела в начальном и конечном состояниях.

При многократных последовательных вытяжках площадь поперечного сечения тела после каждого акта продольной деформации уменьшается в соответствии с выражениями:

$$F_1 = F_0/\lambda_1;$$

$$F_2 = F_1/\lambda_2;$$

.....

$$F_n = F_{n-1}/\lambda_n.$$

Общая степень вытяжки представляет собой произведение вытяжек при отдельных процессах вытяжки:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n. \quad (4.12)$$

Такое представление общей степени вытяжки имеет место, например, при волочении металлов через серию последовательно расположенных волок, при прокатке на прокатных станах, состоящих из серии валков, образующих рабочие каналы соответствующей формы и размеров, при калибровании расплавов полимеров в последовательно расположенных калибрующих пластинах и т. д.

Для непрерывного неизотермического деформирования расплава полимера при экструзии из условия неразрывности процесса для любого сечения на пути формования следует постоянство массового расхода:

$$FV\rho = G = \text{const.} \quad (4.13)$$

Если взять в качестве исходного состояния поперечное сечение на выходе из формирующего отверстия, а за конечное состояние принять размеры изделия, то выражение (4.13) можно представить в виде равенства:

$$F_{\text{ф}} V_{\text{ф}} \rho_{\text{т}} = F_{\text{и}} V_{\text{и}} \rho,$$

из которого следует:

$$\frac{F_{\text{ф}}}{F_{\text{и}}} = \frac{V_{\text{и}}}{V_{\text{ф}}} \frac{\rho}{\rho_{\text{т}}} = \lambda. \quad (4.14)$$

Следовательно, степень вытяжки для непрерывного неизотермического процесса представляет собой произведение отношения конечных и начальных скоростей на объемную усадку расплава при охлаждении (она равна отношению плотностей конечного изделия и расплава при температуре экструзии).

Но в виде (4.14) показатель степени вытяжки не учитывает предшествующую высокоэластическую деформацию, развивающуюся и релаксирующую до выхода из экструзионной головки. На выходе из головки продолжается релаксация обратимых деформаций и напряжений, проявляемая через уменьшение напряжений сдвига и растяжения и увеличение поперечных размеров экструдата, и на струю начинает действовать внешняя сила растяжения, которая приводит к уменьшению поперечных размеров струи на всем пути деформирования. Таким образом, размеры экструдата определяются протеканием двух противоположных процессов — растяжения и сокращения.

Если за начальное состояние при оперировании понятием степени вытяжки принять сечение фильеры на выходе, то отношение площадей поперечного сечения канала фильеры и изделия будет характеризовать только условную вытяжку, поскольку оно не учитывает предшествующую деформацию.

Сложный процесс деформирования можно представить в виде последовательности составляющих его одновременно протекающих более простых процессов. В данном случае это можно представить как разбухание экструдата до равновесного состо-

яния, определяемого предысторией деформирования в головке, и вытяжку расплава из этого равновесного состояния. Схема стадий такого процесса показана на рис. 4.4.

В результате такого преобразования степень вытяжки экструдата можно представить как произведение продольных степеней вытяжки на участке эластического восстановления L_p и на участке «истинной» вытяжки L_B :

$$\lambda = \frac{F_\Phi}{F_p} \frac{F_p}{F_n} = \frac{1}{\lambda_p} \lambda_B, \quad (4.15)$$

причем «истинная» степень вытяжки λ_B учитывает равновесное разбухание экструдата в отличие от условной вытяжки λ , которая характеризует лишь геометрическое изменение сечения экструдата по отношению к начальному. При этом полная длина деформирования расплава представляет собой сумму участков эластического восстановления L_p и «истинной» вытяжки L_B :

$$L = L_p + L_B.$$

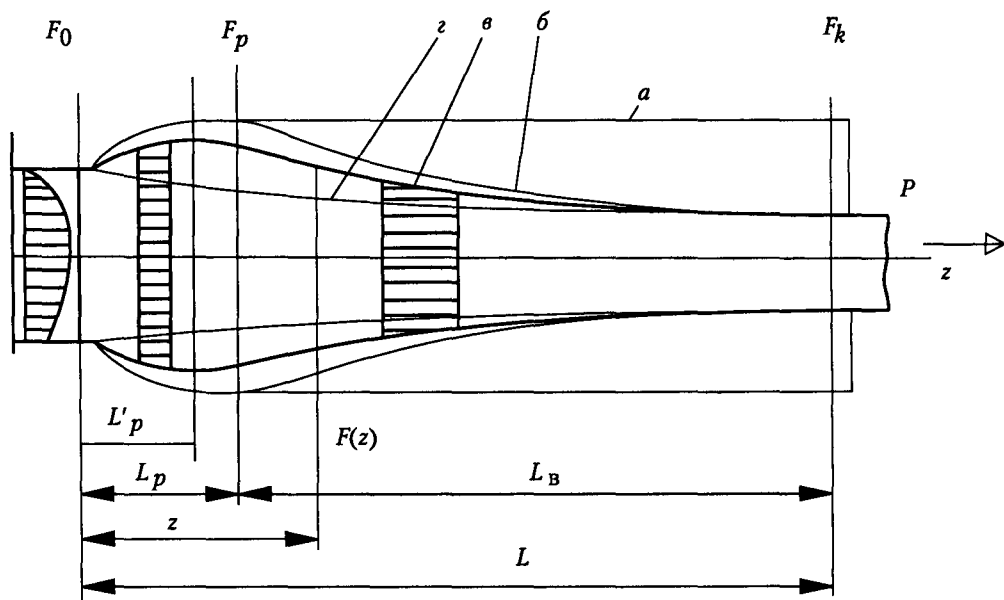


Рис. 4.4. Схема разделения процесса деформирования струи расплава на последовательные стадии [16]:

a — размеры струи расплава после завершения эластического восстановления и в отсутствии вытяжки;

b — «истинная» вытяжка расплава из равновесного состояния;

v — реальный процесс формирования струи расплава; z — форма струи при высокой вытяжке

$F_0, F_p, F_k, F(z)$ — площади поперечных сечений экструдата по длине зоны формирования; P — растягивающая сила; L_p, L_B, L — длины участков эластического восстановления, «истинной» вытяжки и реального процесса

При уменьшении высокоэластической деформации ($\lambda_p \rightarrow 1$) $\lambda \rightarrow \lambda_b$, то есть условная и «истинная» степени вытяжки в пределе совпадают и длина участка деформирования определяется только величиной L_b .

Степень вытяжки в форме (4.15) характеризует только фиксированные состояния расплава. Если продифференцировать выражение (4.15) по координате z , то получим выражение для текущих значений продольных вытяжек, которые уже можно связывать с конкретными переменными параметрами процесса деформирования:

$$\frac{d\lambda}{dz} = \frac{d\lambda_b}{dz} - \frac{d\lambda_p}{dz}. \quad (4.16)$$

Поскольку степени продольной деформации λ_b и λ_p определяются через размеры экструдата и площади поперечных сечений для соответствующего состояния, то необходимо установить характер изменения коэффициентов продольной деформации $\lambda_p(z)$ и $\lambda_b(z)$ по длине соответствующих зон деформации.

Аналитическое решение этой задачи для экструдата некруглого сечения до настоящего времени неизвестно. Численное решение задачи с использованием фундаментальных уравнений неразрывности, движения, теплового баланса и реологического уравнения возможно, но потребует разработки достаточно сложных прикладных программ. Кроме того, неизбежные допущения, которые придется принимать при разработке алгоритмов решения, может существенно снизить точность расчетов. В общем случае решение такой задачи для производства профильных изделий не представляется особенно актуальным, поскольку формование профилей из расплава сопровождается, как правило, калиброванием, которое вносит определенные коррективы в форму и размеры экструдата на всем пути деформирования. Поэтому целесообразно экспериментально определить соответствующие зависимости и использовать их для расчетов.

4.4.3.5. Размеры экструдата при формовании полосы прямоугольного сечения

При формовании полосы из расплава экспериментально установлено, что ее абсолютные размеры по ширине и толщине для разных материалов изменяются неодинаково, поэтому для расчетов размеров формующей щели применяют эмпирические рекомендации, некоторые из которых представлены в главе 6.

Такое неодинаковое изменение размеров обусловлено главным образом проявляемой памятью полимера на предшествующее деформирование расплава в экструзионной головке.

Как было показано выше, площадь поперечного сечения экструдата прямоугольного сечения, формование которого производится на фильере с площадью сечения F_Φ , является функцией размеров фильеры и коэффициентов продольной деформации $\lambda_p(z)$ и $\lambda_b(z)$: $F(z) = f[F_\Phi; \lambda_p(z); \lambda_b(z)]$.

При рассмотрении задачи введем следующие допущения:

- 1) экструдат на всем пути деформирования остается прямоугольным;
- 2) размеры экструдата в конце участка разбухания при приеме экструдата без вытяжки соответствуют «равновесному» состоянию;

- 3) размеры полосы при вытяжке в конце участка деформирования длиной L и определяемые размеры на образцах одинаковы (пренебрегаем термической усадкой образцов).

Поскольку при выдавливании расплава через прямоугольную фильеру с соотношением сторон b_{Φ}/h_{Φ} экструдат имеет несколько бочкообразную форму (в середине толщина экструдата больше, чем по краям), то приходится оперировать средней толщиной; в этом проявляется условность допущения 1. Допущение 2 можно считать достаточно корректным, если не происходит резкого охлаждения экструдата при приеме на подложку, поскольку скорость разбухания достаточно высока, а длина участка разбухания невелика. Допущение 3 достаточно корректно, поскольку коэффициент объемной усадки полимеров, определяемый отношением плотностей при нормальной температуре и в расплаве для большинства полимеров не более 1,2–1,3, что соответствует линейной усадке примерно в 3%.

Площадь поперечного сечения прямоугольной полосы представляет собой произведение ширины на толщину:

$$F(z) = b(z) h(z). \quad (4.17)$$

Рассмотрим относительное изменение размеров по длине зоны деформирования. Для этого продифференцируем выражение (4.17) по z и почленно поделим на $F(z)$:

$$\frac{dF(z)}{F(z)} = \frac{db(z)}{b(z)} + \frac{dh(z)}{h(z)}. \quad (4.18)$$

Предположим, что при малых продольных деформациях элементарных участков можно принять постоянство соотношения изменения относительных размеров по ширине и толщине:

$$\frac{db(z)}{b(z)} : \frac{dh(z)}{h(z)} = a = \text{const}; \quad a \leq 1. \quad (4.19)$$

Текущие относительные изменения размеров на расстоянии z от фильеры получим интегрированием выражения (4.19) при заданных граничных условиях.

При $z = 0$; $b(z) = b_{\Phi}$ и $h(z) = h_{\Phi}$ получим:

$$\beta(z) = \gamma(z)^a, \quad (4.20)$$

где $\beta(z) = \frac{b(z)}{b_{\Phi}}$, $\gamma(z) = \frac{h(z)}{h_{\Phi}}$ — коэффициенты «условной» деформации по ширине и толщине.

Величины $\beta(z)$ и $\gamma(z)$ представляют собой коэффициенты поперечной деформации. Установим их связь с коэффициентом продольной деформации, в качестве которого выступает степень вытяжки $\lambda(z)$.

Поскольку по определению $\lambda = \beta\gamma$ и соответственно для любого поперечного сечения по длине зоны вытяжки $\lambda(z) = \beta(z)\gamma(z)$, то из (4.20) можно установить связь между $\beta(z)$, $\gamma(z)$ и $\lambda(z)$:

$$\begin{aligned}\beta(z) &= \lambda(z)^{\frac{a}{a+1}} = \lambda(z)^{a_b}; \\ \gamma(z) &= \lambda(z)^{\frac{1}{a+1}} = \lambda(z)^{a_h}.\end{aligned}\tag{4.21}$$

Поскольку $a \leq 1$, то $a_b < a_h$. При $a = 1$ $a_b = a_h = 0,5$, т. е. имеет место одинаковая поперечная деформация по ширине и толщине.

В выражениях (4.21)

$$a_b = \frac{a}{a+1};$$

$$a_h = \frac{1}{a+1}.$$

При переменном показателе поперечной деформации $a \neq \text{const}$ для интегрирования выражения (4.19) необходимо определить вид функции $a(z)$.

Показатель поперечной деформации a и его текущее значение $a(z)$ в общем случае характеризуют неодинаковое значение поперечных деформаций по ширине и толщине прямоугольной полосы. Очевидно, аналогичный характер деформаций может наблюдаться и для трубы с наружным диаметром d_n и толщиной стенки h .

Экспериментально изучено поведение различных полимеров промышленных марок [16] и установлено соотношение между значениями «истинных» продольных и поперечных деформаций. Эти зависимости представляют собой в двойных логарифмических координатах прямые линии, исходящие из общего центра ($\lambda_b = 1$) под наклоном, определяемом значением показателя степени v_b и v_h соответственно. Показатели степени степенных уравнений

$$\beta_b = \lambda_b^{v_b}; \quad \gamma_h = \lambda_b^{v_h}; \quad v_b + v_h = 1$$

не зависят ни от размеров фильера, ни от температуры расплава, а определяются только свойствами материала и представляют собой аналог коэффициента Пуассона для анизотропной деформации.

Величина показателя степени v_b для исследованных марок полимеров находится в пределах 0,41–0,48. Значения показателя для различных термопластов приведены в главе 6. На основе полученных соотношений разработаны формулы для расчета размеров формирующего инструмента, учитывающие проявление материалом упругих свойств при формировании из расплава. Вид расчетных формул для каналов различной формы приведен в главе 6.

Анализ схем главных деформаций в механических схемах деформации помогает оценить процессы формоизменения экструдата и связать их с реологическими свойствами материала.

4.4.4. Деформирование при калибровании

Рассмотренное выше относится к свободной вытяжке струи расплава, на которую не действуют никакие внешние силы, кроме продольной силы в режиме формования при постоянной скорости растяжения. Форма экструдата изменяется, когда он подвергается калиброванию. На рис. 4.5 показана форма струи в зависимости от положения калибратора относительно экструзионной головки и формы входа в калибратор. При отсутствии внешних ограничений профиль струи плавно изменяется от диаметра круглого отверстия до конечного размера прутка d (1). При протяжке прутка через калибрующую втулку трение расплава о стенки калибратора на входе создает препятствие протяжке, величина которого будет тем больше, чем больше конусность зоны входа, и экструдат будет вытягиваться в калибраторе (2). Препятствие протяжке вызовет увеличение размеров экструдата на входе и смещение максимального диаметра струи к фильере. Наличие конусного захода в калибратор не обязательно, возможно только скругление острых кромок на входе. Но размеры экструдата на входе в калибрующую втулку нужно подбирать таким образом, чтобы процесс был стабильным во времени, а не колебательным, когда постепенно на входе накапливается масса расплава, затем происходит резкая вытяжка в калибраторе, после чего процесс повторяется. Устранение колебательного процесса зависит от правильно установленного соотношения размеров между формирующим каналом и калибратором, режима

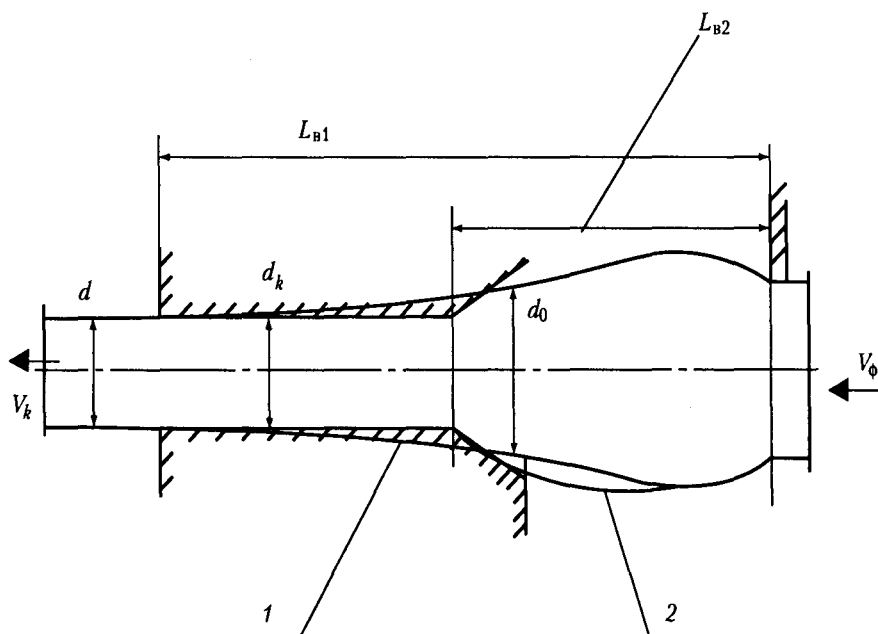


Рис. 4.5. Схема изменения формы струи при калибровании круглого прутка [32, 33]:
1 — профиль струи при отсутствии калибрования; 2 — профиль струи при калибровании протяжкой (по внешнему контуру). L_{B1} — длина зоны вытяжки при отсутствии калибрования; L_{B2} — длина зоны вытяжки при калибровании (если не допускать вытяжки в самом калибраторе)

охлаждения экструдата на входе, коэффициента трения расплава о металл, конструкции входа в калибратор.

Некоторые вопросы деформирования экструдата на входе в калибратор и влияние конструкции калибратора на размеры формующей щели рассмотрены в [32, 33]. Автору не известны другие публикации на эту тему, хотя тема заслуживает внимания даже с теоретической точки зрения, не говоря уже о практической пользе таких исследований.

В главах 5 и 6 некоторые вопросы деформирования экструдата на входе в калибратор рассмотрены более подробно.

Для примера рассмотрим деформирование экструдата круглого сечения на входе в калибрующую втулку.

Предположим, что угол конусности зоны входа составляет α^0 , длина зоны входа $L_{вх}$, диаметр калибрующей втулки d_k и диаметр экструдата на входе в калибратор равен диаметру в начале зоны входа D_0 . Определим условия, при которых экструдат после охлаждения и обжатия в зоне входа примет окончательные размеры d_r (усадкой для простоты расчета пренебрегаем) и не будет вытягиваться в калибраторе.

В зоне входа экструдат имеет вытяжку $\lambda_2 = (D_0/d_k)^2$ и относительное поперечное обжатие $\Delta d/D_0 = (D_0 - d_k)/D_0$.

Боковая поверхность участка входа в калибрующую втулку определяется как

$$S_b = \frac{\pi L_{en}}{2 \cos \alpha / 2} (D_0 + d_k).$$

Нормальные напряжения, возникающие при обжатии экструдата, можно рассчитать приближенно из уравнения связи между напряжением и деформацией:

$$\sigma_l = \varepsilon E(T) = \frac{\Delta d}{D_0} E(T).$$

Предположим, что к концу участка входа экструдат в результате охлаждения от температуры T_0 до T_k приобрел несущий слой толщиной h , который препятствует вытяжке прутка с постоянными размерами в зоне калибратора.

Сила трения по поверхности контакта определится из выражения:

$$F = \sigma_l S_b \mu(T) = \frac{D_0 - d_k}{D_0} E(T) \frac{\pi L_{en} (D_0 + d_k)}{2 \cos \alpha / 2} \mu(T),$$

а растягивающая сила $P_z = F \cos \alpha / 2$.

Эта сила действует на кольцевой участок толщиной h , вызывая в нем растягивающее напряжение $\sigma_z = P_z / (\pi(d_k - h)h)$.

Допустим, что деформация от этого напряжения должна быть не более 1%:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E(T_k)} \leq 1\% . \quad \bullet$$

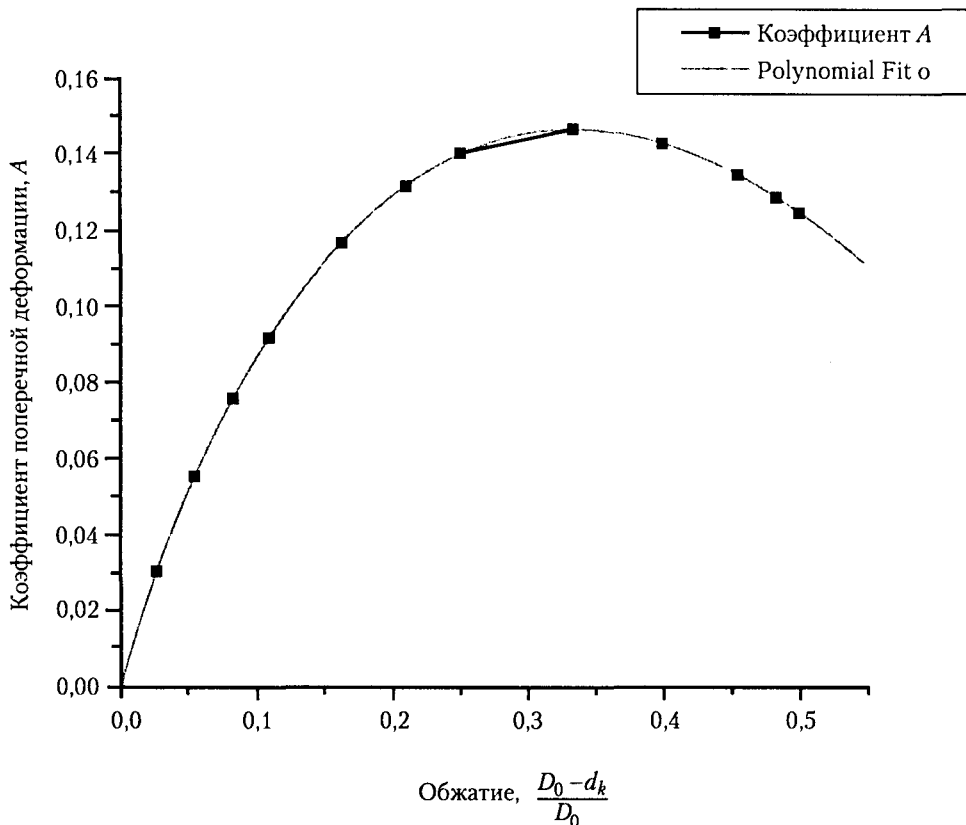


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента поперечной деформации $A = (\Delta D/D_0)/\lambda$ при калибровании круглого прутка протяжкой

После подстановок и решения уравнения относительно толщины кольцевого слоя получим уравнение второй степени:

$$h^2 - d_k h + 50 \frac{L_{en}}{D_0} (D_0^2 - d_k^2) \frac{E(\bar{T})}{E(T_k)} \mu(\bar{T}) = 0.$$

Корни этого уравнения имеют вид:

$$h = \frac{d_k}{2} \pm \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{50 L_{en} (D_0^2 - d_k^2)}{D_0} \frac{E(\bar{T})}{E(T_k)} \mu(\bar{T})}.$$

Здесь модуль упругости $E(\bar{T})$ определяется при средней температуре в зоне обжатия прутка, а $E(T_k)$ — при температуре в конце зоны обжатия, коэффициент тре-

ния $\mu(\bar{T})$ — при средней температуре в зоне входа в калибратор; L_{en} — длина зоны экструдата на входе в калибратор.

Величина необходимого значения «несущего» слоя будет зависеть от значения подкоренного выражения, для нахождения которого необходимы значения модуля упругости деформируемого материала при различных температурах, изменение температуры экструдата в зоне обжатия, зависимость коэффициента трения от температуры.

Отношение относительного поперечного обжатия (поперечная деформация) к степени вытяжки (продольная деформация) представляет собой коэффициент поперечной деформации. В данном случае это не характеристика материала, а параметр его деформирования. На рис. 4.6 показана связь между относительным обжатием и коэффициентом поперечной деформации.

Зависимость между этими величинами, которая может быть представлена в виде полинома четвертой степени, может помочь при выборе оптимального угла зоны входа в калибратор. Очевидно, более сложная картина в математическом отношении будет наблюдаться при рассмотрении деформирования в зоне входа для прямоугольной полосы или иного изделия, отличного от круглого.

Литература

1. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Келви; Пер. с англ. — М.: Химия, 1965. — 442 с.
2. Хан Чанг Дей. Реология в процессах переработки полимеров / Чанг Дей Хан; Пер. с англ. под ред. Г. В. Виноградова, М. Л. Фридмана. — М.: Химия, 1979. — 366 с.
3. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. — М.: Химия, 1977. — 440 с.
4. Мачихин Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 216 с.
5. Rao N. Stromungswiderstand von Extrudierwerkzeugen verschiedener geometrischer Querschnitte / N. Rao // Berechnen von Extruderwerkzeugen. — Dusseldorf: VDI-Verlang, 1977. — S. 43–50.
6. Plajer O. Практическая реология при конструировании экструзионной оснастки / O. Plajer // Plastverarbeiter. — 1969. — Bd. 20. — № 10. — S. 693–703; № 11. — S. 803–807; 1970. — Bd. 21. — № 1. — S. 29–34; № 2, S. 81–88; 1972. — Bd. 23. — № 6. — S. 407–412.
7. Domininghaus H. Конструирование формирующего инструмента / H. Domininghaus // Techn. Rdsh. — 1973. — Bd. 65. — № 15. — S. 9, 11.
8. Plajer O. Прикладная реология / O. Plajer // Plastverarbeiter. — 1978. — Bd. 29. — № 4. — S. 169–175; № 5. — S. 249–252; № 6. — S. 311–314; № 7. — S. 376–378; № 10. — S. 527–534.
9. Angersbach D., Plajer O. Программа компьютерного расчета экструзионных головок / D. Angersbach, O. Plajer // Plastverarbeiter. — 1979. — Bd. 30. — № 10. — S. 601–607; № 11. — S. 716–720; 1980. — Bd. 31. — № 1. — S. 27; № 2. — S. 74–78; № 3. — S. 137–141; № 4. — S. 201–202.
10. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Compulations / W. Michaeli. — Second Edition. — Hanser Gardner Publications, 1992. — 340 p.
11. Lenk R. S. Auslegen von Extrusionswerkzeugen fur Kunststoffschmelzen / R. S. Lenk // Kunststoffe. — 1985. — Bd. 75. — № 4. — S. 239–243.
12. Hensen F. Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik. II Extrusionsanlagen / F. Hensen, W. Knappe, H. Potente. — Munchen, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986. — 708 S.

ГЛАВА 5. КАЛИБРОВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

5.1. Основные методы калибрования

Как уже указывалось ранее, при формировании профилей из большинства жестких термопластов требуется калибрование пластичной заготовки, создаваемой экструзионной головкой. Калибрование осуществляют в специальных охлаждаемых устройствах, называемых калибраторами, где осуществляется деформирование и охлаждение заготовки и придание ей формы и размеров конечного изделия. Этот процесс и называется калиброванием.

Калибрование осуществляется посредством контакта непрерывно движущейся заготовки (экструдата) с охлаждаемыми калибрующими поверхностями. Такой контакт может обеспечиваться различными способами:

- давлением воздуха, подаваемого в полости пустотелой заготовки;
- с помощью вакуума, создаваемого между стенками заготовки и калибрующей поверхностью устройства;
- путем поперечного обжатия при протяжке экструдата через рабочий канал калибратора (по типу волочения для металлов);
- силой тяжести калибрующих элементов и поджимом их.

Чаще всего калибрование производится по внешним поверхностям профиля, но возможны случаи, когда контакту с охлаждаемой поверхностью подвергаются некоторые внутренние полости изделия. Калибрование по внутреннему контуру используется для изделий простой формы, например, трубообразных, если требуется обеспечить гладкую внутреннюю поверхность и точные сопрягаемые размеры. Этот метод требует калибратора специальной конструкции, который можно применять только для достаточно больших изделий.

Контакт экструдата с калибрующими поверхностями может осуществляться также одновременно или последовательно в одном, двух или более блоках одинако-

вой или различной конструкции. Например, возможно предварительное калибрование и охлаждение толстостенных труб сначала в короткой втулке с помощью избыточного давления воздуха, а затем вакуумное калибрование ее неостывшей трубы в длиномерном калибраторе или в вакуумной втулке, установленной на входе в вакуумную ванну.

Некоторые виды светильников из ПММА получают путем протяжки через серию коротких охлаждаемых блоков, в которых экструдат попеременно охлаждается по наружному и внутреннему контуру. Количество блоков зависит от толщины стенки светильника и производительности линии (этот вариант калибрования более подробно рассмотрен в разделе 7.4 главы 7).

Возможны также другие варианты калибрования, которые определяются формой профильного изделия, свойствами материала, производительностью оборудования.

На начальных стадиях развития технологии экструзии профилей применяли простые и очевидные методы калибрования в виде протяжки (волочения) сплошных изделий, поддержки элементов профиля охлаждаемыми вставками, пластического изменения формы простых заготовок и т. д. Для калибрования полых изделий применяли прижатие сжатым воздухом, позже стали использовать вакуум.

В дальнейшем вакуумные калибрующие устройства стали применяться все шире, и в настоящее время они используются даже там, где их применение считалось невозможным, например, при производстве толстостенных труб большого диаметра.

По способу охлаждения изделия при калибровании калибрующие устройства можно разделить на два основных вида — «сухое» и «мокрое» (влажное):

- при «сухом» калибровании охлаждение экструдата осуществляется в результате плотного контакта с металлической поверхностью калибратора, в корпусе которого циркулирует холодная вода; отвод тепла от профиля осуществляется путем теплопроводности через стенку, вода на профиль непосредственно в калибраторе не попадает;
- при «мокрое» калибровании профиль протягивается через серию коротких блоков или металлических пластин, установленных в водяной ванне; охлаждение профиля осуществляется в основном за счет конвективного теплообмена; для интенсификации теплообмена применяют разбрызгивающие форсунки или турбулентный характер циркуляции воды в наливной ванне.

На практике чаще применяют комбинированные методы охлаждения, сочетающие элементы обоих способов. Выбор способа калибрования и охлаждения зависит от формы и размеров профиля, теплофизических свойств материалов калибратора и профильного изделия, производительности оборудования.

Термин «калибрование» подразумевает одновременное деформирование и охлаждение экструдата, так как разделить их при формовании изделий из расплава невозможно. В некоторых случаях используется выражение «деформирование и калибрование» для того, чтобы подчеркнуть, что еще до контакта экструдата с охлаждаемой поверхностью калибратора заготовка подвергается формоизменению по отношению к форме и размерам формирующего отверстия экструзионной головки.

Деформирование и охлаждение необходимо и при получении профилей из резиноподобных материалов (например, из мягкого ПВХ, термоэластопластов, термопластичного полиуретана и др.), имеющих высокий коэффициент трения расплава о ме-

талл и которые не калибруют обычными методами. В этом случае обеспечение нужной формы и размеров осуществляется путем продольной вытяжки экструдата, поджимом различных охлаждаемых вставок, прокаткой через фигурные ролики. Форма экструдата некалибруемых профилей в большинстве случаев близка к форме конечного изделия. Более подробно эти различия рассмотрены в главах 7 и 8 при описании переработки различных термопластов и изготовлении конкретных видов профильных изделий.

По конструкции калибрующие устройства можно условно разделить на длинномерные калибраторы, калибрующие пластины и втулки, калибрующие ролики (валки), комбинированные калибрующие устройства, состоящие из элементов первых трех групп.

Некоторые виды профильных изделий можно формовать путем деформирования и калибрования заготовки простого поперечного сечения (трубы, полосы) в калибраторе любого из указанных типов. Выбор типа калибратора определяется требованиями к изделию, реологическими и теплофизическими свойствами материала, производительностью процесса. Так, например, трубообразные профили с постоянной толщиной стенки и со скругленными углами (квадратные, прямоугольные, многоугольные и т. п.) обычно калибруют именно таким способом.

Раздельное рассмотрение калибрования и течения расплава в экструзионной головке в той последовательности, как представлено здесь, обусловлено логической цепочкой рассмотрения всей проблемы в целом: профиль (форма и размеры, материал изделия, условия эксплуатации)—способ формования (калибрования)—оборудование—оснастка (экструзионная головка)—технология—качество изделия.

В некоторых случаях возможно формование профильных изделий из листовых рулонных заготовок путем их нагрева и пластического деформирования в калибрующем (формующем) устройстве. Этот способ не относится к непрерывному производству изделий из расплава, не имеет промышленного значения и может применяться лишь ограниченно для изготовления некоторых видов изделий простой формы с постоянной толщиной стенки. В этом случае калибрующее устройство является одновременно и формующим инструментом.

Используя пластические свойства экструдата, с помощью специальных приспособлений можно получать изделия с продольными или поперечными гофрами, наносить на поверхность изделия рифы, различные рисунки, тиснение. В разделе 8.2 главы 8 рассматривается, например, технология изготовления рельефных профилей. Производство волнистых листов с продольными или поперечными гофрами здесь не рассматривается, так как они относятся к другой категории изделий (не профильных), но принципы их формования вполне могут быть использованы для изготовления соответствующих видов профильных изделий.

Калибрование многих профильных изделий вызывает значительные трудности, так как приходится согласовывать форму и размеры калибратора и формующего инструмента, подбирать расстояние между ними, обеспечивать необходимые силы прижатия заготовки к охлаждаемым поверхностям калибратора, создавать условия для относительно равномерного деформирования и охлаждения различных участков профиля. Ниже эти вопросы рассмотрены более подробно.

5.2. Конструирование калибрующих устройств

5.2.1. Типовые конструкции калибрующих устройств

Недостаток опыта при конструировании работоспособных калибрующих устройств и в технологии изготовления различных видов профильных изделий приводит к лишним затратам времени и средств для достижения положительного результата. Согласно известной поговорке, умные учатся на чужих ошибках. Но хотя прочувствовать эти ошибки можно только на собственном опыте, чужой опыт необходим для уменьшения собственных ошибок, поэтому ниже приводятся некоторые конкретные рекомендации.

Подробно методы калибрования и используемые устройства описаны в [1].

При проектировании или выборе типа калибрующего устройства следует принимать во внимание следующее:

- Изделия, изготавливаемые из резиноподобных материалов с высокой вязкостью и формоустойчивостью расплава и высокой адгезией расплава к металлу (например, композиции из пластифицированного ПВХ, ТЭП, ТПУ и др.), обычно не калибруют теми способами, какие применяются при изготовлении профилей из жестких термопластов. Такие изделия получают вытяжкой и охлаждением экструдата, форма которого подобна конечному изделию. Для предотвращения искажений изделия под действием собственного веса применяют простейшие поддерживающие устройства в виде охлаждаемых вставок, пластин, планок и плит.
- Для изготовления изделий из жестких термопластов следует применять устройства, в которых обеспечивается принудительный контакт охлаждаемого изделия с калибрующими поверхностями. Давление, создающее этот контакт, должно контролироваться и регулироваться. При слабом контакте трудно получить изделия с гладкой ровной поверхностью и стабильными размерами. При сильном прижатии заготовки к стенкам калибратора и отсутствии свободы пластической деформации возможно образование вмятин, увеличение сил трения и возникновения опасности проскальзывания изделия в траках тянущего устройства, что может вызывать нестабильность или нарушение процесса.
- Калиброванию следует подвергать только основные участки профиля, к точности формы и размеров которых предъявляются повышенные требования. При калибровании менее ответственных участков допускается возможность поперечного перетекания материала при обжатии экструдата, таким образом следует обеспечить деформируемому материалу некоторые степени свободы. В каждом конкретном случае этот вопрос решается индивидуально с учетом реологических и теплофизических особенностей материала.

5.2.1.1. Калибрующие втулки и пластины

Внешний вид калибрующей втулки и калибрующих пластин показан на рис. 5.1, а–в.

При калибровании несложных трубообразных или сплошных профилей пластины или втулки обычно устанавливают в ванне с водой. Их конструкция, количество,



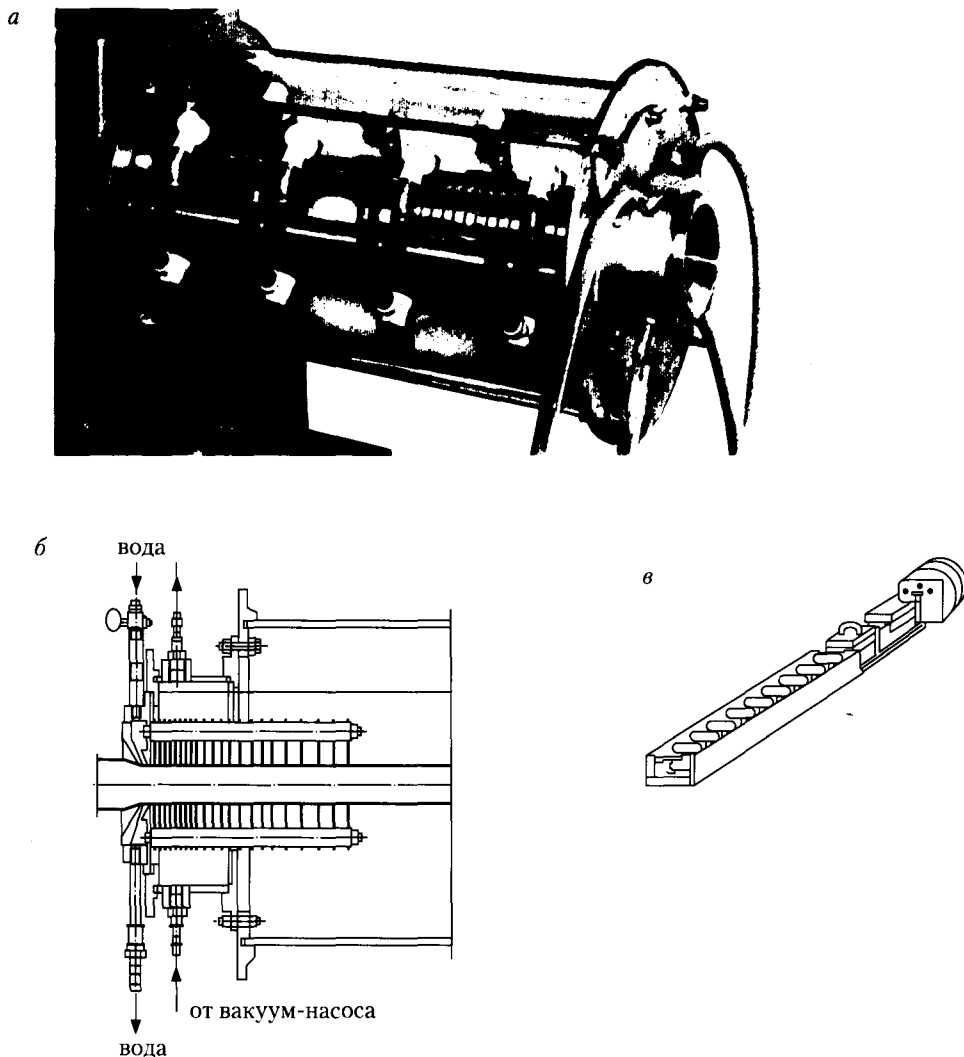


Рис. 5.1. Калибрующая втулка на входе в вакуумную ванну и калибрующие пластины (*Battenfeld*):

а — калибрующая втулка для калибрования трубы; *б* — набор калибрующих пластин, установленных в охлаждающей ванне; *в* — набор пластин в закрытой ванне стабилизации

расположение и расстояние первой пластины или втулки от головки для каждого конкретного профильного изделия устанавливают опытным путем.

При высоких скоростях экструзии пластин требуется больше, расстояние между ними подбирается и регулируется опытным путем. В начале ванны их устанавливают на небольшом расстоянии (10–20 мм), особенно при экструзии полых изделий.



SINA-PLAST

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

Это объясняется стремлением экструдата принять в вакуумной ванне форму, близкую к цилиндрической. При большом расстоянии между пластинами оваллизация экструдата вызовет проблемы с прохождением профиля через отверстия последующих пластин. Это особенно заметно при экструзии медленно остывающих расплавов с повышенной упругостью, например, для изделий из ПЭНП. Для более пластичных материалов (например, для АБС, НПВХ) этот эффект проявляется в гораздо меньшей степени. По мере остывания экструдата и стабилизации формы профиля размеры между пластинами можно увеличивать до 30–50 мм и более.

При калибровании простых изделий (например, пруток, тонкостенная трубка) иногда достаточно 1–2 пластин. Пластины, как правило, делают с разъемом в горизонтальной плоскости, части пластины соединяются через центрующие выступы, шпонки или штифты. Толщина разъемных пластин составляет 10–15 мм в зависимости от способа их соединения и размеров крепежных винтов. Толщина неразъемных пластин, применяемых для калибрования простых изделий, составляет 5–8 мм. Размеры отверстий в пластинах последовательно уменьшают для компенсации термической усадки материала при охлаждении.

Припуск на усадку для каждой из пластин зависит от свойств материала, темпа изменения усадки, скорости отвода изделия, интенсивности охлаждения, расстояния между соседними калибрующими пластинами. Для различных материалов припуск на линейную усадку составляет 0,3–3,5%. Большие цифры относятся к кристаллизующимся материалам типа ПЭВП.

Размеры отверстия первой (обычно неразъемной) пластины, установленной на входе в охлаждающую ванну, и ее расстояние от головки подбирают таким образом, чтобы отверстие полностью заполнялось расплавом, создавая необходимое уплотнение. Однако наплыв расплава на входе не должен быть большим, чтобы экструдат входил в отверстие достаточно плавно, не образуя вмятин и неравномерной вытяжки участков.

Раньше пластины (или втулки) устанавливали на общих направляющих, с помощью которых обеспечивалась их соосность. Такая конструкция предусматривает возможность регулирования расстояния между пластинами (втулками) во время работы (рис. 5.1, б).

При использовании ванн, показанных на рис. 5.1, в, расстояние между пластинами определяется положением пазов в стенках ванны. Такие ванны появились сравнительно недавно, их конструкция запатентована [2, 3]. Их основное назначение — последующее охлаждение профиля после калибрования в блоке «сухих» калибраторов и стабилизация формы изделия при высокой скорости отвода. Их еще называют ваннами стабилизации.

Установка калибрующих пластин производится в пазы в стенках ванны, изготовленной из толстого органического стекла или из нержавеющей стали. Пластины могут иметь вакуумные отверстия и продольные отверстия для интенсивного перетекания воды за счет разницы в разрежении в различных отсеках ванны. Для создания разницы давлений между отсеками пластины уплотняются по контуру. Турбулентное течение воды через пластины способствует интенсификации теплообмена и повышению линейной скорости отвода профиля.

Такие ванны можно использовать также самостоятельно для калибрования профилей в наборе калибрующих пластин.



5.2.1.2. Длинномерные калибраторы

«Сухой» калибратор должен иметь определенную протяженность (длину), в пределах которой осуществляется деформирование и охлаждение экструдата. Длинномерными их называют потому, что длина калибрующего устройства намного больше, чем максимальная ширина профиля. Такое название условно, поскольку для широких профилей отношение ширины к высоте которых невелико, этот критерий не совсем корректен. Уместнее говорить об отношении длины калибратора к толщине стенки профиля, а не к его габаритной высоте.

В длинномерных калибраторах длительность контакта расплава с металлической поверхностью должна быть достаточной для образования на поверхности профиля охлажденного («несущего») твердого слоя, предохраняющего от искажения формы в процессе дальнейшего охлаждения. Слишком большая длина калибрующих устройств нежелательна, поскольку значительно возрастают силы трения, и конструкция устройства становится громоздкой. При небольшой длине калибрующего блока упрощается сверление продольных отверстий для прохода воды и подвода вакуума, но возрастают затраты на изготовление нескольких коротких калибраторов вместо одного длинного.

Обычно рабочая длина калибраторов составляет 150–600 мм. Увеличение длины выше 600 мм вызывает проблемы при изготовлении.

На практике часто собирают конструкцию, состоящую из нескольких «сухих» блоков, разделенных короткими открытыми ваннами, в которые при необходимости подают воду для охлаждения и снижения трения при калибровании. Блоки могут иметь как одинаковую, так и различную длину.

5.2.1.3. «Сухие» вакуумные калибраторы

Вакуумные калибраторы устанавливают на расстоянии 10–100 мм и более от фильеры.

Калибратор обычно имеет 2–3 вакуумные зоны по длине. Между вакуумными зонами могут размещаться поперечные каналы водяного охлаждения. Первую вакуумную зону следует располагать на расстоянии 10–30 мм от входа. Участок входа должен интенсивно охлаждаться. В некоторых случаях перед входом в калибратор или в зоне входа в него целесообразно располагать зону предварительного воздушного или водяного охлаждения профиля. Отверстия для выхода воздуха или воды должны располагаться таким образом, чтобы поток сжатого воздуха был направлен от головки, не допуская ее охлаждения и нарушения теплового режима формования. При предварительном водяном охлаждении нужно следить, чтобы вода поступала на профиль равномерным тонким слоем. Это особенно важно при калибровании кристаллизующихся материалов, неравномерное охлаждение которых вызывает коробление профиля и нарушение процесса.

При изготовлении разнотолщинных профилей может потребоваться дифференциальное охлаждение его участков. Это можно обеспечить с помощью установки индивидуальных воздушных сопел, выполненных из гибких металлических шлангов, положение которых относительно профиля легко регулируется.

Острые кромки деталей на входе в калибратор следует скруглить. Участок входа длиной 10–30 мм должен иметь уклоны не более 3–5° к оси экструзии. При изготовлении трубообразных профилей в некоторых случаях выполняют участок входа без



уклонов стенок, а только со скруглением на входе острых кромок деталей, поскольку при поперечном обжатии экструдата и быстром его охлаждении на поверхности профиля могут возникнуть вмятины или складки. Радиус скругления — 1–5 мм в зависимости от размеров деталей. Аналогичные скругления без уклонов иногда применяют и при изготовлении других типов профилей.

На рис. 5.2 показана типовая конструкция длинномерного вакуумного калибратора в разобранном виде. Сборная конструкция состоит из набора плоских деталей, соединяемых между собой винтами. В основании 1 и крышке 6 имеются независимые полости, соединяемые с вакуумным коллектором. В каждой из этих полостей можно создавать, при необходимости, нужную величину разрежения, контролируруемую индивидуальным вакуумметром. В типовых конструкциях калибраторов основания и крышка могут иметь одинаковую конструкцию для многих видов профильных изделий и изготавливаться промышленным способом, например, литьем алюминиевых или магниевых сплавов. За рубежом многие детали типовых калибраторов унифицированы, их легко приобрести на специализированных предприятиях. К унифицированным деталям кроме крышки и основания относятся боковые планки, штуцеры, детали центрования и крепления (штифты, винты, шпонки), установочные плиты.

Детали 2–5 относятся к формообразующим, так как именно они придают окончательную форму и размеры экструдированному профилю. В большинстве случаев для

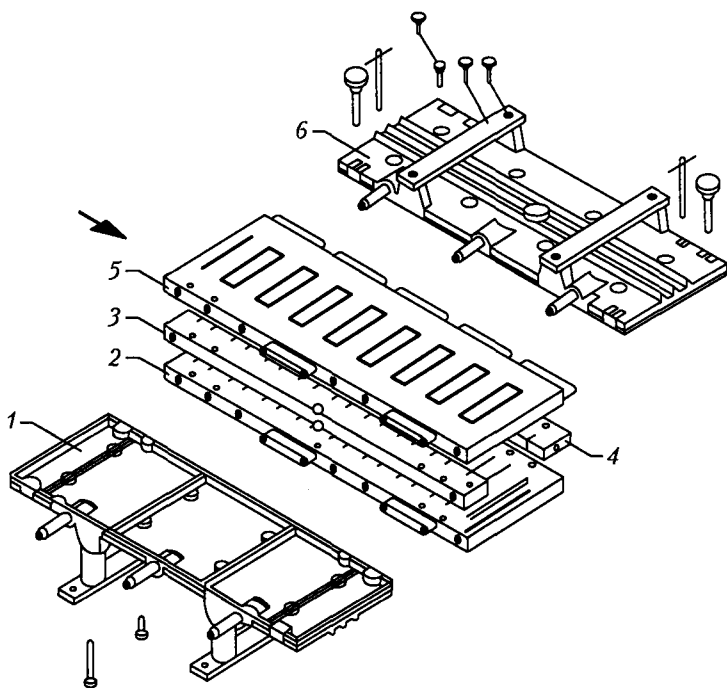


Рис. 5.2. Детали длинномерного вакуумного калибратора:

1 — основание; 2 — плита охлаждения нижняя; 3, 4 — боковые вставки; 5 — плита охлаждения верхняя; 6 — крышка



SINA-PLAST

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

серийного изготовления профилей эти детали выполняют из нержавеющей стали, не требующей химической обработки, и на деталях из которой можно достичь высокой чистоты обработки. Иногда применяют детали из цветных металлов: алюминиевых сплавов, латуни, бронзы, но они, как правило, недолговечны, дороги и требуют дополнительной химической обработки: хромирования, анодирования. Их преимущество заключается в малом весе деталей и повышенной теплопроводности, а недостаток — в недолговечности и повышенной стоимости по сравнению со сталью.

Длинномерные калибраторы, применяемые при производстве большинства профильных изделий, выполняют разъемными. Для удобства работы крышки калибраторов выполняют откидывающимися, а формообразующие детали (например, 2–5 на рис. 5.2) — быстросъемными. Боковые вставки могут иметь возможность поперечного перемещения в случае заклинивания экструдата в зазоре между деталями. Положение боковых вставок подбирается экспериментально при отладке процесса.

Подвод воды для охлаждения часто производят шлангами, оснащенными быстросъемными гайками, при этом их штуцеры на корпусе калибратора должны иметь соответствующую конструкцию.

5.2.1.4. Калибровочные дорны (для калибрования по внутренним поверхностям)

Охлаждаемые калибровочные дорны для внутреннего калибрования применяют только при изготовлении изделий простой формы с малоразвитой поверхностью, поскольку при охлаждении экструдата происходит термическая усадка материала и сильное обжатие дорна, в результате чего возможно заклинивание профиля на дорне, если не предусмотреть мер для предотвращения этого явления.

Калибровочные дорны могут устанавливаться на угловых или прямооточных головках, конструкция которых позволяет осуществить подвод и отвод охлаждающей воды.

Для обеспечения легкого съема профиля калибровочный дорн должен быть выполнен с небольшим уклоном поверхностей в направлении движения. Величина уклона определяется поперечной линейной усадкой расплава при охлаждении. Значения линейной усадки для некоторых термопластов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Значения термической усадки для некоторых термопластов [4, 5]

Материал	Рекомендуемая температура расплава при экструзии, °С	Линейная усадка, %
АБС	190–210	0,59–0,63
Поликарбонат	280–300	0,30–0,85
НПВХ	180–200	0,50–0,60
ПЭВП	180–210	2,45–2,50
ПЭНП	120–160	1,56
ПВХ пластифицированный	150–170	2,35
АЦБ этрол	150–180	0,84
ПА 12	190–220	1,60
Полипропилен	190–220	2,0–2,3
Полистирол ударопрочный	170–210	0,59



При получении профильных изделий простой формы (например, квадратной, треугольной с одинаковой шириной граней) целесообразно использовать калибровочный дорн соответствующей формы с фильерой кольцевого сечения.

Калибровочные дорны по конструктивным соображениям могут применяться при производстве профильных изделий с высотой по внутреннему размеру не менее 25 мм.

В настоящее время калибровочные дорны применяются сравнительно редко, поскольку они требуют довольно сложной конструкции экструзионной головки. Их применение возможно при комбинированном калибровании полых профилей, когда внутренняя и наружная поверхности одновременно подвергаются охлаждению. В этом случае длина калибровочного дорна может быть сравнительно небольшой, но достаточной для предварительного охлаждения внутренней поверхности.

5.2.1.5. Калибровочные ролики

Некоторые профильные изделия калибруют парными профильными роликами с индивидуальным охлаждением. В конструкции парных роликов предусматривается регулировка рабочего зазора между ними. Такой вид калибрования можно использовать для резиноподобных материалов, поскольку здесь трение скольжения заменяется качением.

Целесообразно предусматривать «мягкий» прижим калибрующего ролика к поверхности изделия (например, с помощью пружин с регулируемым поджатием).

Поскольку поверхность контакта при таком способе невелика, используют набор калибрующих роликов или валков. Одновременное обжатие экструдата со всех сторон в отверстии, образованном парой роликов, нежелательно, так как может привести к поверхностным дефектам вследствие большой разницы окружных скоростей на боковых и лицевых поверхностях. Поэтому вместо одной пары применяют серию последовательно расположенных прокаточных роликов, в которых прижатие профиля производится к одной из поверхностей, а остальные остаются свободными. На этом принципе работают ламинаторы для прикатки декорирующей или защитной пленки к поверхности некоторых видов профильных изделий.

5.2.2. Способы установки и крепления

Конструкцию калибрующего устройства следует разрабатывать совместно с конструкцией экструзионной головки. Обычно до начала работы головку и калибратор устанавливают соосно, для чего калибратор устанавливают на калибровочном столе, который имеет возможность продольного, поперечного, а иногда и углового перемещения. Конструкции калибровочных столов рассматриваются в главе 2.

Калибрующие устройства устанавливают на станине калибровочного стола на специальной опорной плите, которая крепится к столу, а блоки калибраторов — на опорной плите. Плита входит в комплект калибратора вместе с дополнительными устройствами охлаждения и стабилизации (рис. 5.1, в).

Некоторые типы коротких калибраторов, например, для пневмо- или вакуумно-калибрования, могут крепиться непосредственно к экструзионной головке на направляющих штангах.

5.2.2.1. Материалы деталей и обработка рабочих поверхностей

Формообразующие детали калибрующих устройств обычно изготавливают из латуни, дюралюминия или нержавеющей стали. Возможно применение и других видов конструкционных сталей с использованием защитных покрытий от коррозии. При использовании калибрующих устройств, в которых охлаждение изделия осуществляют в основном только за счет контакта с рабочими поверхностями калибратора, предпочтение отдают материалам с большей теплопроводностью.

Калибрующие пластины, устанавливаемые в ванне с водой, могут быть изготовлены из хромированной стали или анодированного дюралюминия. Износостойкие хромовые покрытия применяют и для длинномерных калибраторов, изготовленных из латуни.

При промышленном производстве больших партий профильных изделий целесообразно изготовление формообразующих деталей из нержавеющей стали, обеспечивающей высокое качество чистоты обработки и износостойкость рабочих деталей в течение длительной эксплуатации. Гарантийная стойкость таких устройств составляет не менее 1 млн погонных метров профиля.

Износостойкие покрытия или повышенная твердость формообразующих деталей уменьшают необходимость восстановления поврежденных или изношенных поверхностей, но высокую твердость следует придавать только испытанным и принятым к эксплуатации деталям.

Для изготовления изделий из ПВХ, ПЭВП и других жестких термопластов рабочие поверхности калибрующих устройств следует полировать до чистоты 0,32–0,63 мкм. При изготовлении изделий из ПЭНП иногда рекомендуют использовать детали с матовой рабочей поверхностью с чистотой обработки поверхностей 2,5–1,25 мкм. Это связано с особенностями трения материала при калибровании. Для большинства жестких термопластов чистота поверхности каналов калибраторов должна быть выше, чем для эластичных материалов (ПЭНП, эфироцеллюлозных пластиков, полужестких композиций ПВХ и др.).

5.3. Охлаждение профильных изделий

Как правило, толщина стенок большинства профилей не превышает 10 мм, а чаще находится в пределах 1–5 мм. Скорости отвода профилей на современных экструзионных линиях относительно высоки и достигают 1–10 м/мин и более (раздел 2.3 главы 2; главы 7, 8).

На выходе из калибрующего устройства температура поверхности профиля может быть еще достаточно высока, и для предотвращения нежелательного деформирования профиля необходимо дополнительное охлаждение. В зависимости от толщины стенок изделия и формы применяют дополнительное воздушное или водяное охлаждение. При экструзии тонкостенных профилей иногда достаточно установки одного или нескольких блоков «сухих» калибраторов, а дополнительное охлаждение осуществляется за калибратором путем естественной конвекции.

5.3.1. Водяное охлаждение

Применяется для относительно толстостенных профилей (более 2 мм) или при высоких скоростях экструзии относительно простых изделий (например, сайдингов). Полые профили охлаждают в погружных ваннах с циркулирующей холодной водой, в результате чего обеспечивается высокая интенсивность теплоотдачи от профиля к охлаждающей среде (раздел 5.4.2). При производстве профилей сложной конструкции, особенно разнотолщинных, иногда используют термостатирование профиля в ванне с горячей водой или с помощью инфракрасного нагрева. Это обеспечивает плавное охлаждение профилей и снижение в них остаточных напряжений, но снижает линейную скорость экструзии.

Некоторые типы профилей, особенно толстостенных и разнотолщинных, целесообразно охлаждать с помощью распылительных форсунок, устанавливаемых в открытых охлаждающих ваннах с разных сторон профиля. Такой метод позволяет осуществлять дифференциальное охлаждение его участков путем изменения положения форсунок относительно поверхности профиля и регулированием расхода жидкости для каждой форсунки.

5.3.2. Воздушное охлаждение

Тонкостенные изделия с толщиной стенок до 1–1,5 мм при высокой скорости экструзии допускается охлаждать с помощью подачи сжатого воздуха. Конструктивно это решается установкой после калибратора закрытого воздушного тоннеля, в который воздуходувкой нагнетается воздух. Интенсивность теплообмена при таком способе невысока, но может быть достаточной для быстрого и относительно «мягкого» охлаждения быстро твердеющих расплавов.

Значения коэффициентов теплоотдачи при различных способах охлаждения приведены в разделе 5.4.2.

5.4. Определение технологических размеров калибраторов

5.4.1. Размеры поперечного сечения

Размеры поперечного сечения канала калибратора принимают большими, чем соответствующие размеры изделия на величину линейной термической усадки перерабатываемого материала. Обычно величина линейной усадки в зависимости от теплофизических свойств полимера находится в пределах от 0,1–0,5 до 3–3,5% [4–7].

Линейная усадка неодинакова в продольном и поперечных направлениях, поскольку изделие при экструзии подвергается ориентации, которая влияет на теплофизические свойства материала [6, 7]. Большая усадка наблюдается в направлении ориентации. При экструзии профилей обычно это продольное направление. Несколько меньше усадка в направлении обжатия экструдата, например, по толщине стенки. Точный учет величин усадок в различных направлениях при экструзии бывает необ-

ходим в редких случаях при изготовлении профильных изделий повышенной точности. Напротив, эти знания необходимы при литье под давлением, где разработаны специальные методики для расчета линейных усадок. В [4] приведены графические зависимости по усадке термопластов в разных направлениях, в [7] показано, как производится расчет с помощью компьютерного анализа в прикладной программе *MoldFlow* и других подобных прикладных программах.

Обычно при проектировании калибраторов линейную усадку принимают одинаковой в поперечных направлениях, если нет точных данных о значениях этой величины в зависимости от условий процесса. Значения линейной термической усадки для некоторых термопластов приведены выше в табл. 5.1.

5.4.2. Охлаждение расплава в калибраторе. Определение времени охлаждения

Время пребывания и интенсивность охлаждения экструдата в калибраторе должны обеспечить постоянство размеров профиля после выхода из калибрующего устройства.

При калибровании профиля на наружной поверхности экструдата образуется твердый («несущий») слой, препятствующий изменению формы профиля после калибратора. К внешним силам, действующим на профиль, относятся тяговое усилие и силы смятия профиля в траках тянущего устройства, а также силы, возникающие при резке профиля, силы тяжести при приемке и складировании профиля.

Толщина твердого несущего слоя определяется интенсивностью и временем охлаждения экструдата.

Несущий слой при калибровании подвергается растяжению. К моменту выхода из калибратора средняя температура несущего слоя должна быть ниже температуры стеклования (для аморфных полимеров) или температуры кристаллизации — для кристаллизующихся. В табл. 5.2 приведены значения допускаемого напряжения некоторых термопластов на растяжение.

В калибраторе тепловой поток отводится от изделия через поверхность, определяемую длиной и периметром зоны контакта. Длина зоны контакта в общем случае не равна общей длине калибратора и зависит от многих факторов: теплофизических

Таблица 5.2. Значения $T_{\text{вых}}$ и $[\sigma_p]$ для некоторых термопластов [1]

Материал	Средняя температура несущего слоя на выходе $T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	Допускаемое напряжение $[\sigma_p]$ на растяжение, МПа
НПВХ	75	25
ПЭВП	90	25
ПЭНП	70	10
АБС	80	25

Примечание. Допускаемое значение деформации растяжения принимается равным 1%.

свойств материала, скорости экструзии, удельного давления калибрования. Вследствие усадочных явлений в результате охлаждения и кристаллизации (для кристаллизующихся полимеров) происходит уменьшение наружных размеров профиля и нарушение теплового контакта. Для компенсации усадки по длине вакуумного калибратора должно создаваться повышенное разрежение (для полых, камерных и некоторых сплошных изделий) или канал должен уменьшаться по наружным размерам к выходу на величину линейной усадки. На практике применяют первый способ, так как для применения второго необходимо знание величины усадки в зависимости от свойств материала и конкретных условий экструзии.

При охлаждении калибратора холодной водой температуру на поверхности калибрующих каналов до начала экструдирования профиля можно принять равной температуре воды. Контакт с горячим расплавом изменяет температуру на поверхности калибратора в направлении его длины довольно сложным образом. При плотном контакте с экструдатом с достаточной степенью точности можно принять среднюю температуру по длине постоянной [8–12].

При «сухом» калибровании теплообмен между экструдатом и калибратором осуществляется в основном путем теплопроводности через стенку изделия. При вакуумном калибровании полых профилей полагают, что внутренняя стенка профиля находится в адиабатических условиях, так как можно пренебречь влиянием на теплообмен воздуха, находящегося во внутренней полости изделия. Охлаждение сплошных профилей зависит от характера контакта с калибратором. В большинстве случаев контакт имеет место только с одной стороны, поскольку при двухстороннем контакте резко возрастают силы трения, что может вызвать заклинивание профиля между формообразующими деталями калибратора. Введение водяной смазки и некоторое увеличение зазора между формообразующими деталями позволяет получать изделия высокого качества при интенсивном охлаждении профиля с обеих сторон.

Изменение температуры по толщине стенки профиля описывается уравнениями нестационарной теплопроводности в одномерной или двумерной формах. Для изделий, у которых габаритные размеры во много раз больше толщины стенки, без большой погрешности можно принять одномерную форму уравнений. Для толстостенных сплошных изделий, например, толстостенных плит, требуется двумерная форма уравнения. Двумерная нестационарная теплопроводность в полимерах относится к весьма сложным вопросам, еще сравнительно мало изученным, поэтому рассмотрение ее выходит за пределы обсуждаемой темы.

Уравнение одномерной нестационарной теплопроводности в прямоугольных координатах для изделия с толщиной стенки h может быть представлено в виде [13]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial h} \left(a \frac{\partial T}{\partial h} \right), \quad (5.1)$$

где a — коэффициент температуропроводности, равный $\frac{\lambda}{\rho C_p}$, а входящие в него величины теплопроводности λ , плотности ρ и теплоемкости C_p являются функциями температуры.

Уравнение решается конечно-разностными численными методами при заданных граничных и краевых условиях [8, 9, 12, 13]. Для расчета необходимо иметь температурные зависимости теплофизических свойств полимеров. Расчет позволяет проследить изменение температуры по слоям толщины стенки во времени (или по длине калибратора) в зависимости от конкретных параметров процесса: производительности, температуры расплава, температуры охлаждающей воды и т. д. Анализ результатов расчета позволяет целенаправленно конструировать калибрующее и охлаждающее устройства или регулировать параметры технологического процесса. Такой метод расчета целесообразен для высокоскоростной экструзии крупнотоннажных партий труб или профилей, поскольку неправильное определение длины пути охлаждения приводит к большим материальным затратам.

В обычной практике используют более простые, хотя и менее точные методы расчета времени охлаждения. Предлагается много расчетных формул для определения времени охлаждения тел различной формы при литье под давлением, например, [4, 14]. Использование этих формул при экструзии не всегда корректно, поскольку расчет по ним дает заниженные значения времени. Причиной этого является различие условий охлаждения в литьевой форме и в калибраторе. Существенную погрешность в расчеты вносят также характеристики теплофизических свойств полимера в зависимости от температуры и выбор характерного размера в уравнениях для анализа теплопроводности.

Распределение температуры по сечению охлаждаемого изделия и время образования несущего слоя, способного противодействовать внешним нагрузкам при заданных технологических параметрах процесса, рассчитывают по известным температурным зависимостям теплопроводности, плотности, теплоемкости и модуля упругости материала. Неплотный контакт экструдата с калибратором из-за усадочных явлений или других причин может давать значительные отклонения фактических параметров по сравнению с расчетными. Поэтому при подобных расчетах вводят определенные допущения, которые на практике не всегда удается обеспечить.

Температурные зависимости теплофизических свойств материалов можно найти в опубликованных книгах, справочниках, статьях, фирменных проспектах, на сайтах Интернета, например, [1, 4, 6, 9, 15–20]. В большинстве случаев теплофизические характеристики определяются типом материала и мало зависят от молекулярной массы и других особенностей конкретных марок. Поэтому для приблизительных расчетов использование данных по конкретной марке полимера допускается и для других марок того же класса.

Анализ температурных зависимостей аморфных и кристаллизующихся полимеров позволяет более осмысленно выбирать границы их применимости и выполнять расчеты охлаждающих устройств. Следует иметь в виду, что для кристаллизующихся полимеров в точках фазовых переходов (плавление, кристаллизация) на графике функций теплоемкости или теплопроводности в зависимости от температуры имеется разрыв, и использование монотонной функции, построенной по экспериментальным данным, некорректно. Поэтому диапазон, в котором используют температурные зависимости теплофизических характеристик, разбивают на участки, в пределах которых зависимости представляются непрерывной функцией. Это же относится и к аморфным полимерам, для которых монотонность функций в точках фазовых пере-

ходов нарушается, но отклонение обобщенной зависимости от эксперимента данных в этих точках невелико.

В [6] проводится анализ изменения теплофизических характеристик разных термопластов в зависимости от температуры. Показано, что удельная теплоемкость большинства материалов близка по значению, ее величина не зависит от гидростатического давления, незначительно увеличивается (на 15–30%) с возрастанием температуры на 373 °К в областях выше и ниже областей температурных переходов и повышается (в 5–10 раз) в области плавления полимера.

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности также имеют определенные значения для большинства промышленных полимеров. Теплопроводность в стеклообразном состоянии увеличивается с повышением температуры, а у кристаллических термопластов она практически не изменяется. У полукристаллических полимеров значения коэффициента теплопроводности снижаются с возрастанием температуры. Чем меньше степень кристалличности полимера, тем ниже его теплопроводность. Изменение значения коэффициента может достигать 30–40%.

Теплопроводность значительно зависит от степени ориентации полимера [6], значение для твердых термопластов возрастает в направлении ориентации в 5–10 раз по сравнению с неориентированным материалом и снижается на 20–30% в поперечном направлении. По-видимому, аналогичное явление должно наблюдаться и в расплавленных полимерах.

Значения теплофизических характеристик некоторых термопластов приведены в табл. 5.3 [6].

В [1, 12, 20] приводятся обобщенные значения теплофизических свойств разных термопластов в зависимости от температуры.

Удельную теплоемкость в различных температурных интервалах с приемлемой для практических расчетов точностью можно рассчитать по формулам:

Температура, °С	C_p , кДж/(кг · °С)
<i>ПЭВП</i>	
20–120	$18,8T + 262$
120–128	$1080T + 127500$
138–134	$-1470T + 198500$
134–180	$8T + 1380$
<i>Наполненные композиции ПВХ</i>	
20–140	$3,07T + 778$
140–180	$-4,48T + 1820$
<i>Пластифицированный ПВХ</i>	
20–180	$5T + 960$
180–200	$-10T + 3660$
<i>Полистирол</i>	
20–110	$7,3T + 686$
110–150	$-8,95T + 246$
150–190	$3,5T + 630$

Таблица 5.3. Теплофизические свойства некоторых полимеров [6]

Полимер	c , кДж/кг · К	λ		α , 10^{-6} м ² /с	$T_{пл}$, К	T_c , К	Теплота плавления, кДж/моль
		Вт/м	К				
ПЭВП	1,8–2,4	0,4–0,50	293–373	1,9–2,5	393–404	143	7,54–8,38
ПЭНП	2,5–4,3			1,0–1,3			
	2,0–3,5	0,29–0,42	293–343	1,4–1,6	376–388	138	–
ПП	2,4–4,0	0,28–0,38		1,1–1,2			
	1,7–1,9	0,12–0,25	293–403	1,3	433–445	277	8,79–10,89
ПС	1,2–1,8	0,14–0,18	293–368	1,1–1,3	–	373	8,38–10,00
ПА-6	1,7–2,5	0,27–0,28	293–423	1,0–1,6	488–501	223	21,78–23,46
ПА-610	1,8–2,0	0,19–0,20	293–423	1,0–1,6	486–495	–	54,47–56,56
ПА-12	1,9–2,0	0,27–0,28	293–423	0,9–1,3	451–453	–	–
ПА-66	–	0,25	293–423	2,4	540	214	44,40–46,00
ПК	1,2–2,4	0,20–0,28	293–423	1,5–2,7	493–513	416–424	–
ПФА и сополимеры формальдегида	1,2–2,3	0,18–0,30	293–423	0,8–1,4	446–453	151	7,12
ПЭТФ	1,0–2,3	0,21–0,28	293–513	1,0–1,6	498–540	347	22,62–24,30
ПБТФ	2,2–2,6	0,25–0,30	293–473	1,1–1,3	496–500	316	–
	2,7–3,5	0,29–0,34		1,1–1,4			
ПММА	1,3–1,7	0,19–0,20	293–360	0,9–1,1	–	368–378	–
ПСФ	2,5–4,0	0,20–0,22	293	0,6–1,7	–	463–468	–

В ряде работ [12, 19, 21–23] проводится анализ охлаждения при экструзии полимерных изделий различной формы и различных режимах охлаждения. Например, в табл. 5.4 приведены значения коэффициента теплоотдачи при калибровании трубы $\varnothing 100$ из ПЭВП, показывающие влияние конструкции различных охлаждающих устройств [21].

Прикладные программы компьютерного моделирования на основе МКЭ позволяют определять распределение температур в стенках охлаждаемого изделия в зависимости от используемых систем охлаждения.

В программе, разработанной в Институте переработки пластмасс (IKV) (Аахен, ФРГ) для расчета двухмерного нестационарного процесса охлаждения используют итерационный метод, при котором интервал охлаждения разбивают на множество мелких интервалов, в пределах которых теплофизические характеристики можно принять постоянными [23]. Используя граничные и краевые условия, находят соответствие между математической моделью и фактическим температурным полем пу-

Таблица 5.4. Средние значения коэффициента теплоотдачи для трубы $\varnothing 100$ мм

Способ калибрования или охлаждения	Размеры калибратора и устройств для охлаждения	Расход воды		Средние значения коэффициента теплоотдачи α , Вт/(м ² · К)
		л/ч	при $T_{\text{в}}$, °С	
Калибрование в длинномерном калибраторе без спирального канала охлаждения	Материал калибра — латунь: $L_{\text{к}} = 300$ мм, $h = 3$ мм	300	100	338 $\alpha^* = 354$
То же, но со спиральным каналом	Материал калибра — латунь: $L_{\text{к}} = 300$ мм; $h = 3$ мм; 4-заходный спиральный канал сечением 5×3 $T_{\text{а}} - T_{\text{в}} = 30$ К	300	10	861 $\alpha^* = 883$
Свободная конвекция в открытой водяной ванне				412
Принудительная конвекция в ванне с калибрующими пластинами	$V_{\text{от}} = 2$ м/мин; расстояние между пластинами 60 мм		10	916
Охлаждение разбрызгиванием из форсунок	Длина пути охлаждения 6 м	1000		1752 (форсунки под углом 45° к трубе)
Охлаждение воздухом через перфорированное кольцо	$T_{\text{а}} - T_{\text{в}} = 20$ К	—	—	10

Примечание. $T_{\text{в}}$ — температура воды; $L_{\text{к}}$ — длина пути охлаждения; h — толщина стенки калибра; $T_{\text{а}}$ — температура на поверхности трубы; $V_{\text{от}}$ — скорость отвода; α^* — модифицированный коэффициент теплоотдачи, относящийся к наружной поверхности трубы.

тем итерационного изменения величины коэффициента теплопередачи α до приемлемой относительной разницы между ними. Экспериментальный анализ охлаждения калибруемых профильных изделий проводился с помощью специальных миниатюрных термопар, устанавливаемых в стенках калибратора на разной глубине от поверхности канала. Температура контролировалась только в характерных точках профиля, где наблюдается неизбежное нарушение температурного равновесия в системе охлаждения. На рис. 5.3 показаны зоны на поверхности камерных и сплошных профилей из ПВХ, для которых производились вычисления.

Экспериментально установлено, что на входе в калибратор при контакте с расплавленной заготовкой происходит резкое повышение температуры стенок калибратора, что приводит к ухудшению процесса теплопередачи. Этот же факт был установлен в более ранних работах [9, 10] при исследовании охлаждения полиолефиновых труб и труб из НПВХ.

Процесс охлаждения наружной поверхности завершается практически полностью уже на расстоянии примерно 80 мм от входа в калибратор. Решающее влияние на процесс охлаждения полых профилей оказывает наличие контакта между охлаждаемой стенкой калибратора и поверхностью экструдированного профиля, обеспечиваемого вакуум-насосом.

При охлаждении профильных изделий за счет конвективной теплопередачи градиенты изменения температуры имеют более пологий характер по сравнению с теплопередачей теплопроводностью.

Коэффициенты теплоотдачи существенно различаются для различных участков профиля, однако диапазон изменения соответствующих значений α приблизительно одинаков по порядку величины. Наиболее высокие значения коэффициента наблюдаются для плоского участка 1, где обеспечивается хороший контакт расплава со стенками калибратора ($1700\text{--}2100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$). В зоне двухстороннего охлаждения выступа 3 α составляет $600\text{--}900$, так как здесь проявляется влияние свободной термической усадки материала, ухудшающей контакт между расплавом и стенками калибратора и соответственно теплоотдачу.

Значения α минимальны для Т-образного участка. В таких зонах из-за медленного охлаждения, обусловленного концентрацией полимерной массы, наблюдается склонность к образованию утяжек и к ухудшению контакта. Среднее значение α для такого элемента находится в пределах $360\text{--}560 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

В табл. 5.5 приведены значения коэффициентов теплоотдачи для некоторых типов камерных профилей из жесткого ПВХ [13,23].

Как признают сами авторы [13, 23], точность расчета невелика, и даже при точном расчете экструзионной головки и зоны охлаждения нет гарантии рентабельного производства профильных изделий из ПВХ. Во избежание ошибок необходим целенаправленный технологический и качественный контроль процесса и изделия.

Приведенные данные могут быть использованы для ориентировочной оценки интенсивности охлаждения и влияния конструкции профиля на теплообмен и коробление изделий.

Полагают, что при экструзии профилей сложной формы невозможно сделать однозначный вывод об общем характере теплопередачи от поверхностного контура к стенкам калибратора, как в случае охлаждения плоских или трубообразных профилей.

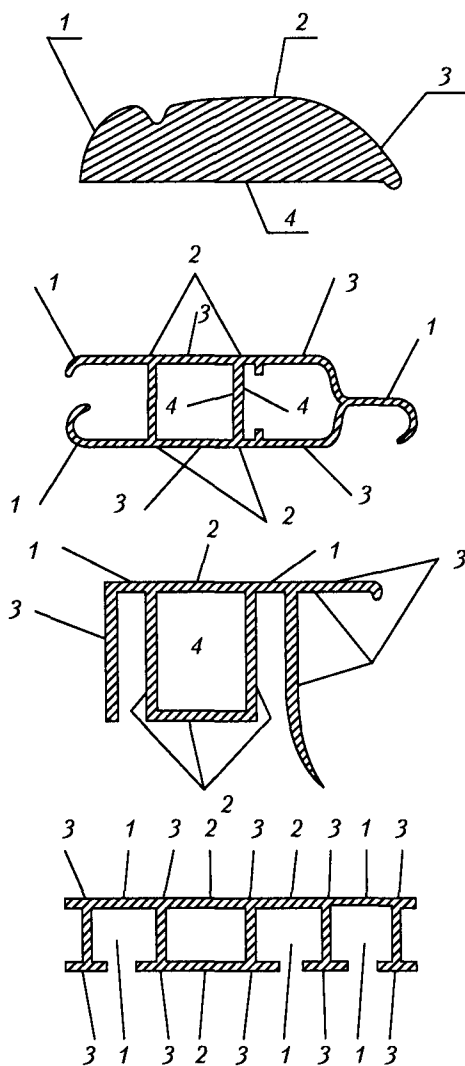


Рис. 5.3. Значения коэффициентов теплопередачи при охлаждении и калибровании профилей из ПВХ (см. табл. 5.5):

1 — молдинг-накладка из пластифицированного ПВХ (сплошной профиль); 2 — жалюзийная планка (камерный профиль); 3 — картинная рама (полый профиль); 4 — планка (камерный профиль)

Последние два десятилетия характеризуются интенсивным развитием специализированных прикладных программ для компьютерного моделирования технологических процессов. Такие программы разработаны в США, Бельгии, Германии, Австрии. Одной из таких программ является программа численного компьютерного моделирования *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), применение которой для анализа тече-

Таблица 5.5. Коэффициенты теплоотдачи для камерных профилей из жесткого ПВХ

Профиль, тип профиля, материал	Способ калибрования, охлаждения	Температура охлаждающей среды, °C	Зона охлаждения	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К)
Молдинг-накладка, сплошной, пластифицированный ПВХ	Воздушное	25	1–4	5
			1	420
			2	340
			3	420
			4	420
	Охлаждение разбрызгиванием	10	1	220
			2	180
			3	220
			4	310
Жалюзийная планка, камерный, НПВХ	Вакуумный сухой калибратор	25	1	600
			2	570
			3	1660
			4	0
Картинная рама, полый, НПВХ	Вакуумный сухой калибратор	15	1	1470
			2	1500
			3	820
			4	0
Планка, камерный, НПВХ	Вакуумный сухой калибратор	15	1	1730
			2	1030
			3	1990
			4	0

ния расплава в головке и охлаждения в калибраторе показано в [24]. Аналогичные способы моделирования демонстрирует бельгийская программа «PolyFlow», имитационные программы фирмы «Rapra Technology», США.

В [24] полагают, что при рассмотрении теплоотвода от профиля и распределения температуры по длине калибрующего устройства необходимо использовать трехмерное нелинейное уравнение теплопроводности с конвективным переносом тепла в квазистационарном состоянии. При этом следует учитывать перенос тепла в результате конвекции, теплопроводности через стенку и теплового излучения. Это более общий и самый сложный в математическом отношении случай расчета.

Как и в других прикладных программах здесь также используются сеточные методы и осуществляется автоматизированное разбиение профиля и зоны калибрования на конечные элементы. Автоматически составляется также система дифференциальных уравнений для описания процессов теплопроводности и затем выдается их числовое и анимационное графическое решение в виде изотерм температур по толщине стенки. Для типичной системы калибрования решается система с несколькими сотнями тысяч дифференциальных уравнений, для составления и решения которых на высокопроизводительном компьютере потребуется примерно 20–30 мин.

Реологический анализ материалов, оптимизация оснастки с помощью технологий компьютерного моделирования, качественное исполнение металлических деталей сделали возможным создание технологической оснастки для экструзии профилей с производительностью до 500 кг/час, а при применении многоручьевой экструзии — и до 1500 кг/час. «Экономичная граница» производства профилей методом экструзии находится сегодня примерно на уровне 400 кг/час для одноручьевой экструзии и 800 кг/час — для двухручьевой (более подробно многоручьевая экструзия рассмотрена в главе 8).

Необходимость предварительного расчета охлаждения особенно очевидна при экструзии толстостенных изделий: массивных профилей, стержней, плит. Это обусловлено специфической технологией изготовления стержней и плит. В отличие от «тянущей» обычной технологии производство стержней и плит можно отнести к «толкающей» технологии, при которой тянущее устройство не применяется, а охлажденное изделие непрерывно и равномерно выталкивается работающим шнеком из блока охлаждения, установленного вплотную к экструзионной головке. Ошибка в выборе оборудования и длины калибратора не позволит получить качественное изделие. Теоретическое обоснование охлаждения расплава при «толкающей» технологии рассмотрено в [25] и в разделе 8.1 главы 8.

Для повседневной работы нужны более простые методы анализа и расчета и привлечение опыта других производителей. В [26] рассмотрен метод определения пути охлаждения с помощью тепловой аналогии. Суть ее состоит в следующем. Основным безразмерным критерием процессов охлаждения является критерий Фурье, значение которого может быть вычислено по простой формуле:

$$Fo = \frac{a\tau}{h^2}, \quad (5.2)$$

где a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$; τ — время охлаждения, ч; h — толщина стенки, м.

Коэффициент температуропроводности связан с теплофизическими характеристиками материалов зависимостью:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (5.3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность материала; $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p — удельная теплоемкость, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Основное положение расчета состоит в том, что при экструзии геометрически подобных изделий одинаковые условия охлаждения обеспечиваются при равенстве критериев Фурье. Таким образом, согласно этому условию, длину зоны охлаждения можно рассчитать на основании известного из практики случая. Метод пригоден для определения длины зоны охлаждения в установках для производства пленки, листов, труб, профилей.

Время охлаждения зависит от скорости движения изделия V_0 в зоне охлаждения длиной L_k :

$$\tau = \frac{L_k}{V_0}. \quad (5.4)$$

С учетом (5.2)–(5.4) критерий Fo можно представить в виде:

$$Fo = \frac{\lambda}{C_p \rho} \frac{L_k}{V_0 h^2}. \quad (5.5)$$

Одинаковые условия охлаждения соответствуют равенству $Fo_0 = Fo$, где Fo_0 — известное значение показателя для геометрически подобного изделия; Fo — значение критерия для рассчитываемого случая охлаждения.

Из выражения (5.5) может быть рассчитана длина пути охлаждения рассматриваемого изделия:

$$L_k = Fo_0 V_0 h^2 \frac{\rho C_p}{\lambda}. \quad (5.6)$$

Приравнивать критерии Fo допускается только для геометрически подобных изделий из разных материалов; для одинаковых материалов при разной производительности процесса, и нельзя сравнивать охлаждение, например, трубы с листом или пленкой.

Профильные изделия состоят из участков различной геометрии — прямоугольных, круглых сплошных, кольцеобразных. По условиям охлаждения эти участки могут быть схожими с охлаждением листа, трубы или прутка при стреножном гранулировании. Например, трубообразный профиль, очевидно, охлаждается так же, как труба равного внешнего периметра; камерный профиль, состоящий из замкнутого и открытого участка, охлаждается различным образом на замкнутой полости и открытом участке: в первом случае как труба, во втором как лист или толстая пленка. Поэтому при определении длины охлаждения профильного изделия необходимо правильно выбрать теплофизический аналог.

В выражение (5.6) входит линейная скорость отвода изделия, которая связана с весовой производительностью экструзионной установки G . В табл. 5.6 приведены формулы для расчета G и Fo для известного случая экструзии и L_k для рассматриваемого случая охлаждения.

Пример

Определить длину охлаждения при изготовлении квадратной трубы $22 \times 22 \times 2,5$ из жесткого ПВХ (масса 1 м — 273 г) на установке с производительностью 150 кг/час.

Известно, что на технологической линии с максимально возможной производительностью 80 кг/час эта труба отводится со скоростью 4,3 м/мин (фактическая производительность $G = 68$ кг/час). Калибрование квадратной трубы осуществляется в вакуумной ванне с помощью разъемных вакуумных втулок. Длина пути калибрования 0,6 м, длина пути охлаждения — 4 м.

Теплофизические характеристики ПВХ при 20 °C:

$$\lambda = 0,14 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}); \quad C_p = 0,20 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}); \quad \rho = 1,4 \text{ г}/\text{см}^3.$$

При температуре 200 °C $C_p = 0,43 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

При средней температуре в зоне контакта профиля с калибратором $C_p = 0,32 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$. Теплопроводность λ от температуры зависит незначительно.

Таблица 5.6. Формулы для расчета G , Fo_0 и L_K [26]

Изделие	G , кг/час	Fo_0	L_K
Лист, плоская пленка	$bhpV_0$	$\frac{\lambda}{C_p} \frac{b}{h} \frac{L_K}{G}$	$\frac{C_p}{\lambda} \frac{h}{b} G Fo_0$
Труба, рукавная пленка	πDhV_0	$\frac{\lambda}{C_p} \frac{\pi D}{h} \frac{L_K}{G}$	$\frac{C_p}{\lambda} \frac{h}{\pi D} G Fo_0$
Стренги (прутки) цилиндрические	$\frac{\pi}{4} d^2 \rho z V_0$	$\frac{\lambda}{C_p} \frac{\pi z}{4} \frac{L_K}{G}$	$\frac{C_p}{\lambda} \frac{4}{\pi z} G Fo_0$

Примечание: b — ширина листа или плоской пленки; h — толщина стенки пленки, листа, трубы; D — наружный диаметр трубы или рукава рукавной пленки; z — количество прутков при стреновом гранулировании.

Для известного (базового) случая охлаждения число $Fo = 0,1165$.

Расчетная скорость отвода квадратной трубы $V_0 = 9,16$ м/мин, для такой скорости длина пути калибрования $L_K = 1,32$ м, что более чем вдвое превышает длину втулок в первом случае, $Fo = 0,7767$, общая длина пути охлаждения трубы — 8,86 м.

Таким образом, в линии должно быть установлено не менее двух охлаждающих ванн длиной по 4 м или же процесс с такой скоростью следует осуществлять по двухручьевой схеме.

Подобный метод расчета достаточно прост и позволяет быстро определить необходимые величины на основе правильно выбранных тепловых аналогов, хотя и не дает распределение температуры по толщине стенки изделия.

5.5. Технологические проблемы калибрования

Неравномерное охлаждение в калибраторе или при последующем охлаждении вызывает образование остаточных напряжений в профиле, что приводит к его искривлению, образованию утяжек, искажению формы изделия. Но неравномерное охлаждение — не единственная причина ухудшения качества экструзионных изделий. Анизотропия свойств, в том числе теплофизических, связанная с ориентацией, влияет на многие характеристики изделия. При резком охлаждении анизотропия свойств фиксируется, что создает неравновесную структуру. Наличие термических градиентов, изменяющихся во времени, является причиной возникновения и релаксации напряжений и деформаций. Их значения неоднородны в различных частях изделия, по-разному проявляется и их воздействие на состояние изделия при эксплуатации.

Проблемы термоупругости применительно к процессам калибрования и последующего охлаждения профильных изделий при экструзии рассмотрены в работе [27]. На основе программы численного моделирования проводится сравнение различных методов калибрования и охлаждения при изменении технологических параметров процесса.

ренней поверхности в шелевом зазоре между деталями). Толщина щели между деталями несколько выше номинальной толщины стенки изделия, что упрощает протяжку экструдата между ними. Охлаждение и деформирование расплава осуществляется при наличии водяной смазки, подаваемой на внутреннюю или наружную поверхность профиля, что позволяет изменять контактные условия в широких пределах.

При двухстороннем контакте профиля с калибратором теплоотвод от профиля производится с обеих сторон, поэтому за расчетную толщину стенки принята половина ее толщины.

В качестве физической модели охлаждения используется уравнение нестационарной теплопроводности в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (5.7)$$

где x — ось пространственных координат, которая выбрана для рассмотрения теплопередачи теплопроводностью.

Обычно продольная координата обозначается z , по ширине прямоугольного участка — x , по толщине полосы — y . Поскольку в первую очередь нас интересует теплопередача по толщине стенки, то в выражении (5.7) вместо x следует использовать координату y , или, в явном виде, h .

Уравнение дополняется начальными и краевыми условиями, теплофизические характеристики представляют в виде непрерывных математических функций, о которых упоминалось выше.

При переходе через температуру фазового перехода изменяются и механические характеристики материала. В работе модуль упругости материала выше температуры стеклования принимался равным нулю, поскольку его значение много ниже значения в твердом состоянии. Возникающие при охлаждении термические напряжения являются причиной остаточных напряжений в изделии.

В упрощенной модели расчета влияние вязкости на распределение напряжений по толщине стенки не учитывали.

Напряженно-деформированное состояние охлаждаемого расплава ниже T_c (или $T_{кр}$) представляли в локальной системе координат системой уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^h \sigma(y, \tau) dy = N; \\ \int_0^h \sigma(y, \tau) \left(y - \frac{h}{2} \right) dy = M; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} = 0; \\ \sigma(y, \tau) = E [\varepsilon(y, \tau) - \alpha T(y, \tau)], \end{cases} \quad (5.8)$$

где $\sigma(y, \tau)$ и $\varepsilon(y, \tau)$ — нормальное напряжение и соответствующая деформация, действующие в плоскости yz ; α — коэффициент линейного термического расширения; h — толщина стенки профиля; N, M — нормальная сила и изгибающий момент, возникающие при охлаждении.

Расчет охлаждения проводился по уравнению (5.7) методом итераций, полученные данные использовались для расчета изменения напряжения σ по уравнениям 2–4 в системе (5.8).

Программа расчета создает имитацию термоупругого поведения широкого класса промышленных марок полимерных материалов, для которых имеются соответствующие температурные зависимости. На основе анализа полученных данных по распределению температур, напряжений и деформаций можно оценить конструкции калибрующих устройств и влияние технологических параметров процесса.

Математически подтвержден известный из практики факт изгиба плоской пластины в сторону более горячей стороны; по мере выравнивания температур с обеих сторон напряжения уменьшаются, изгиб сокращается и исчезает.

При охлаждении профиля с наружной поверхности ниже T_c (или $T_{кр}$) модуль упругости приобретает значение больше нуля и к выходу из калибратора становится вполне значимым. Поскольку слои профиля при охлаждении имеют разную температуру и на выходе из калибратора, то возникают термические напряжения, которые при последующем охлаждении фиксируются и становятся остаточными.

При двухстороннем охлаждении изгибу участков профиля препятствуют стенки калибратора, что соответствует третьему уравнению системы (5.8).

Поскольку материал становится упругим только при $T < T_c$, напряженное состояние возникает сначала в поверхностной зоне, затем, если калиброванию подвергать внутреннюю полость, внешняя частично релаксирует от нагрева собственным теплом. На выходе из калибратора, где средняя температура по толщине стенки уже ниже T_c , напряженное состояние возникает и во внутренних областях стенки.

Локальная релаксация напряжений путем прерывистого охлаждения в относительно коротких блоках играет весьма важную роль для снижения остаточных напряжений и уменьшения изгиба профиля в сторону более медленно охлаждающихся слоев. Вместе с тем сложные температурные изменения при локальной релаксации способствуют очень неравномерному распределению напряжений.

Авторы отмечают, что измерение пространственного распределения напряжений в относительно тонких профилях сопряжено с большими экспериментальными трудностями, в связи с чем возможно ошибочное толкование некоторых фактов.

При калибровании крышки кабель-канала шириной 120 мм наилучшие результаты по минимуму искажения формы профиля получены при преимущественном охлаждении внутренней полости изделия.

При калибровании корпуса кабель канала $40 \times 40 \times 1,6$ мм снижение контактного давления при внутреннем калибровании приводит к образованию выпуклого профиля со сведенными ножками; при снижении контактного давления по внешней поверхности стенки профиля получаются достаточно плоскими, но ножки разведены по отношению к номинальному состоянию.

При калибровании крышки шириной 100 мм из НПВХ было отмечено влияние скорости экструзии на распределение напряжений. Малая скорость экструзии и ка-

калибрование только по внутренней поверхности способствует образованию вогнутости на крышке. По мере увеличения скорости происходит перераспределение напряжений и наилучшие результаты достигаются при некоторой средней скорости, в данном случае при скорости 3,5 м/мин; дальнейшее увеличение скорости до 4,5 м/мин увеличивает выпуклость крышки.

Увеличение контактного давления при внутреннем калибровании крышки вызывает образование вогнутости на внешней поверхности. Снижение расхода охлаждающей жидкости во внутренней полости калибратора улучшает условия выравнивания напряжений, и при некотором значении расхода (0,25 от номинального) достигается равномерное распределение напряжений и выравнивание формы изделия.

В данной работе рассматривалось влияние только условий калибрования и охлаждения на распределение остаточных напряжений и форму изделия. Но кроме них на качество профиля влияют равномерность выхода расплава из головки по ширине деля, соосность головки калибратора, температурный режим в головке и в цилиндре экструдера и много других факторов, которые порой невозможно учесть математически, но которые влияют на качество изделия.

Практический опыт технологов и операторов экструдеров позволяет получать качественные изделия независимо от теоретических предсказаний, но понимание сути происходящих явлений способствует накоплению еще большего опыта.

Литература

1. РТМ по расчету и конструирования технологической оснастки для экструзии профильных изделий из термопластов: ротапринт / НПО «Пластик». — М., 1983. — 383 с.
2. EP Pat. 0659536 B1.
3. Frank P. Apparatus for cooling plastic profiles. Technoplast Kunststofftechnik, Austria. US Pat. 5499507, 19.02.1996, US Class 62/63.
4. Kunststoffe Hoechst. Spritzgiessen von Thermoplasten. Руководство по конструированию литьевых форм фирмы Hoechst. — 1971. — С. 160–162.
5. 75 основных правил изготовления из термопластов литьевых прецизионных изделий // Plaste und Kautsch. — 1977. — Bd. 24. — № 2. — С. 114–122.
6. Сабсай О. Ю. Технологические свойства пластмасс / О. Ю. Сабсай, Н. М. Чалая // Пластич. массы. — 1999. — № 6. — С. 3–9.
7. Барвинский И. И. Расчет линейной усадки и коробления с использованием коэффициентов усадки. ООО «Инженерная фирма АБ Универсал». Компьютерный анализ. Анализ усадки и коробления в технологии Moldflow / И. И. Барвинский // <http://abuniver.webzone.ru>
8. Menges G. Определение температуры и времени охлаждения при экструзии с раздувом / G. Menges, M. Kulik, F. Rhiel // Plastverarbeiter. — 1973. — Bd. 24. — № 10. — С. 622–624; № 11. — С. 685–690.
9. Крейнин Е. Б. Тепловой расчет калибрующих устройств для производства труб / Е. Б. Крейнин, В. В. Швабауэр // Пластич. массы. — 1975. — № 10. — С. 67–70.
10. Влияние комплектующего оборудования на качество экструдированных изделий / W. Michaeli, P. Junk, J. Wortberg, etc. // Plastverarbeiter. — 1976. — Bd. 27. — № 9. — С. 490–495; № 10. — С. 529–538; № 11. — С. 613–615.
11. Kamp W. Калибрование и охлаждение труб из полиолефинов / W. Kamp, H.-D. Kurz // Kunststoffe. — 1980. — Bd. 70. — № 5. — С. 257–263.

12. Швабауэр В. В. Исследование и разработка методов расчета процессов калибрования и охлаждения при высокоскоростной экструзии труб из термопластов: Дис... канд. техн. наук / В. В. Швабауэр; МИХМ. — М., 1981.
13. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations. — Second Edition / W. Michaeli. — Hanser Gardner Publications, 1992. — 340 p.
14. Завгородний В. К. Литьевые машины для термопластов и реактопластов / В. К. Завгородний, Э. Л. Калинин, Е. И. Марам. — М.: Машиностроение, 1968. — 374 с.
15. Молчанов Ю. М. Физические и механические свойства полиэтилена, полипропилена и полиизобутилена / Ю. М. Молчанов. — Рига: Зинатне, 1966. — С. 99–106.
16. Hoechst Plastics. Hostalit. Информационные материалы фирмы Hoechst. — ФРГ, 1971.
17. Пивень А. Н. Теплофизические свойства полимерных материалов: Справ. / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. — Киев: Вища школа, 1976. — С. 69–111.
18. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: Справ. / Под общей ред. акад. АН УССР Ю. С. Липатова. — Киев: Наукова думка, 1977. — С. 6–73.
19. Кизис П. А., Швабауэр В. В., Гвоздев И. В., Володин В. П. Технологические размеры калибрующего устройства для производства труб из термопластов. Пластические массы. — 1985. — № 1. — С. 48–50.
20. Новиченок Л. Н. Теплофизические свойства полимеров / Л. Н. Новиченок, З. П. Шульман; Под ред. член-кор. АН БССР А. Г. Шашкова. — Минск: Наука и техника, 1971. — 117 с.
21. Kleindienst U. Теплопередача при калибровании и охлаждении экструдированных пластмассовых труб / U. Kleindienst. — *Plastverarbeiter*. — 1977. — Bd. 28. — № 10. — S. 513–520.
22. Grunschloss E. Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи при охлаждении трубы / E. Grunschloss, L. Radschenko. // *Plastverarbeiter*. — 1979. — Bd. 30. — № 10. — S. 631–639.
23. Новые аспекты переработки ПВХ / W. Feistkorn, J. Breil, B. Gesenhues, etc. // 12 Kunststofftechnisches kolloquium des IKV in Aachen, 21–23 Marz, 1984. — Aachen, 1984. — S. 463–510.
24. Швайгер Майнхард. Машины и инструмент фирмы «Technoplast» для успешного производства профилей методом экструзии. Семинар «Технопласт — новые технологии в России», фирма Technoplast (Австрия), Москва, 31.01–01.02, 2001.
25. Gang J. Математическая модель процесса охлаждения движущегося расплава термопласта / J. Gang, M. Charmchi, S. Chen // *Polym. Eng. and Sci.* — 1992. — V. 32. — № 11. — P. 724–731.
26. Ast W. Простой метод расчета длины зоны охлаждения при экструзии термопластов / W. Ast // *Kunststoffe*. — 1979. — Bd. 63. — № 4. — S. 186–193; *Ind. & Prod. Eng.* — 1979. — № 3. — P. 80, 82–84, 86, 87.
27. Carrara C. Численное моделирование процессов калибрования полимерных материалов при экструзии / C. Carrara, L. Taglificio, G. Milano // *Tecnopolimeri e resine*. — 1982. — № 6. — С. 25–30.

ГЛАВА 6. ЭКСТРУЗИОННЫЕ ГОЛОВКИ

Под понятием «профиль» обычно понимают непрерывно экструдированное изделие любого поперечного сечения. Однако в промышленности переработки пластмасс профиль, как правило, имеет относительно сложное, чаще всего асимметричное поперечное сечение, и габаритные размеры изделия относительно невелики. Поэтому конструкции головок для изготовления профильных изделий имеют ряд специфических особенностей.

Основное назначение экструзионной головки состоит в том, чтобы преобразовать поток расплава, подаваемого под давлением шнека экструдера, в «заготовку» определенной формы и размеров, из которой далее в результате калибрования и охлаждения оформляется требуемое профильное изделие; таким образом, головка обычно работает совместно с калибратором. На рис. 6.1 показана схема этой пары для получения камерного профиля.

«Заготовка» (экструдат) на выходе из головки не обязательно должна быть подобна форме поперечного сечения профиля, но ее размеры задаются с учетом формоизменений, происходящих на стадии калибрования и охлаждения. Не обязательна также стадия калибрования. Некоторые материалы не требуют калибрования экструдата. Это связано, как уже отмечалось в главе 4, с особенностями формования некоторых термопластов. Более подробно особенности переработки различных термопластов рассмотрены в главе 7.

Рассмотрим, из каких деталей состоит экструзионная головка и какие функции каждая из них выполняет.

Конструкция экструзионной головки зависит от типа экструдированного изделия (сплошное, полое, комбинированное, с сердечником и т. д.), от размеров изделия, свойств перерабатываемого материала и от принятой технологической схемы формования изделия.

6.1. Типовые конструкции

Все формующие головки по положению оси фильеры делятся на прямоточные (ось фильеры совпадает с осью цилиндра); угловые (ось фильеры располагается под углом к оси цилиндра экструдера) и офсетные (смещенные) — ось фильеры смещена параллельно оси цилиндра.

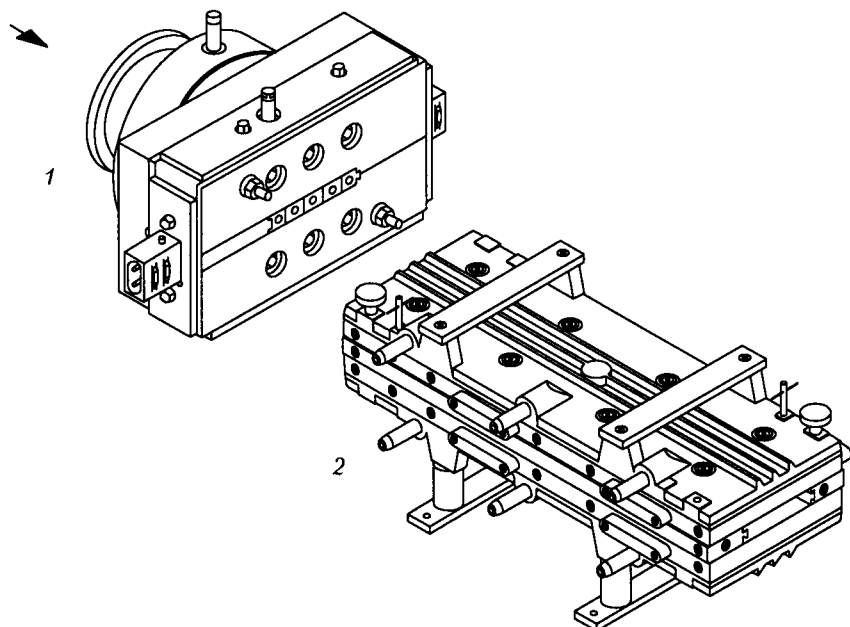


Рис. 6.1. Экструзионная головка (1) и калибратор (2) [1]

В зависимости от типа формируемого изделия экструзионные головки можно разделить на следующие виды:

- головки для сплошных изделий открытого типа (тип 4);
- головки для трубообразных, полых или камерных изделий (типы 1–3);
- головки для производства комбинированных изделий (многоцветных, из различных материалов — тип изделий 5);
- головки для производства изделий с сердечником (тип 6);
- головки для производства изделий из вспенивающихся материалов (могут относиться к любому типу профилей) [2, 3].

В головках для производства полых или камерных изделий оформление внутренних полостей изделия осуществляется с помощью дорнов, прикрепленных к дорнодержателям или составляющих с ним одно целое. Дорнодержатели выполняются в виде крестовины со спицами или перфорированных решеток, в которых имеются сверления для подачи воздуха в замкнутые полости формируемого изделия. Иногда применяют комбинированные дорнодержатели, состоящие из крестовины со спицами и перфорированной решетки: такие конструкции позволяют уменьшить следы разделения потока спицами дорнодержателя и разнотолщинность трубообразных профилей.

Головки для производства комбинированных соэкструзионных изделий крепятся одновременно к двум или более экструдерам, подающим материалы различного цвета или состава в общую для экструдеров деталь головки.

Дублированные профили (например, самоклеющиеся молдинги с алюминиевой фольгой) могут быть прямоточными или угловыми. Оснастка для производства дублированных профилей рассмотрена в главе 8.

Экструзионные головки для производства изделий с сердечником выполняются по типу кабельных, чаще всего бывают угловыми, реже — офсетными.

Головки для изготовления изделий из вспененных материалов могут быть любой конструкции, поскольку профили из этих материалов возможны любого типа. Переработка вспенивающихся материалов имеет некоторые особенности, поэтому головки для формования пеноматериалов рассмотрены отдельно в разделе 8.2 главы 8.

По конструкции головки разделяются на корпусные, блендовые и комбинированные. Первые чаще всего применяются для изготовления малогабаритных сплошных или трубообразных профилей и содержат в своем составе мундштук и дорнодержатель с дорном, которые формируют поток расплава.

Блендовая конструкция головок является в настоящее время наиболее распространенной; она состоит из ряда последовательно соединенных плит одинаковой или различной толщины, в которых выполнены рабочие каналы для прохода расплава. На рис. 6.2 приводится схема такой головки в разобранном виде, на которой показаны составляющие части головки.

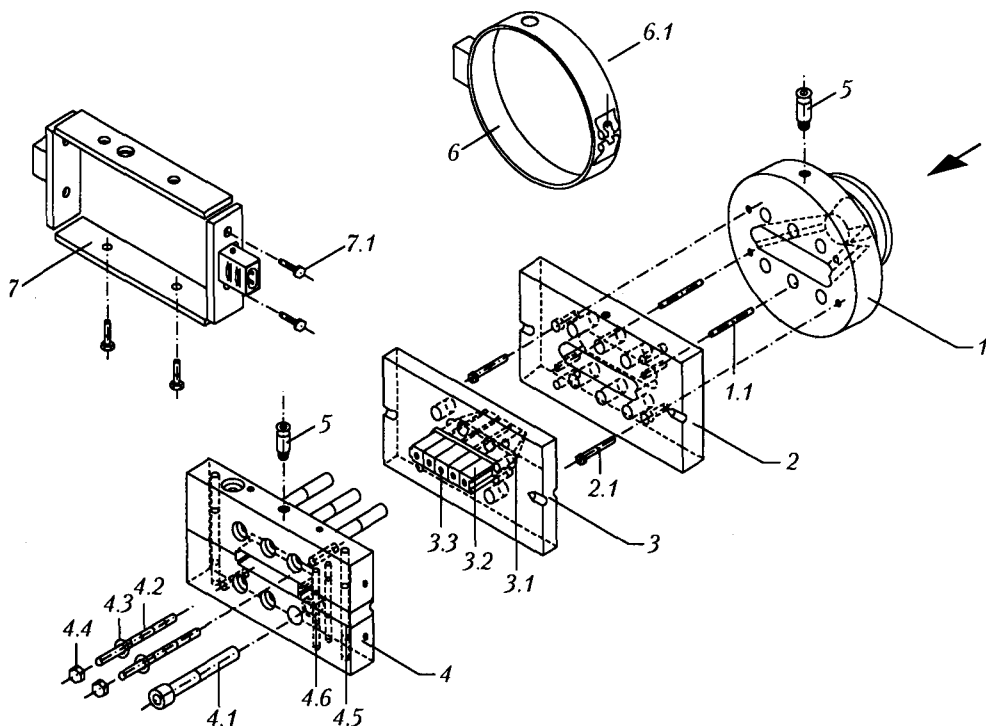


Рис. 6.2. Конструкция блендовой экструзионной головки [1]:

1 — адаптер; 2 — корпус; 3 — дорнодержатель; 4 — фильера; 5 — гильза для крепления термопары; 6, 7 — нагреватели

В зависимости от габаритов изделия размеры головок могут значительно отличаться. На сегодняшний день головки для получения профильных изделий не унифицированы ни по конструкции, ни по габаритным размерам. В отличие от головок для производства труб, на которых изготавливают ограниченное число типоразмеров труб, профильные головки изготавливают самых разнообразных размеров. Это связано с многообразием форм профильных изделий и с необходимостью индивидуального подбора конфигурации деталей головок для каждого изделия. Близкие по форме и размерам профили можно изготавливать на головках приблизительно одинаковой конструкции, отличающихся только по форме и размерам формирующего отверстия.

Приведенные на рис. 6.1 и 6.2 конструкции головок в настоящее время являются типовыми, что уже является основой для их унификации. Возможно, в будущем при соответствующей координации эта задача будет решена, если будут найдены критерии для унификации. Это могли бы быть габаритные размеры под стандартные нагреватели, применяемые и продаваемые в различных странах и соответствующие определенным международным нормам, стандартные размеры плит-заготовок блендовых головок, из которых собираются головки и т. д. А главное, такая задача должна быть поставлена перед международным сообществом, пока же она не является актуальной.

При изготовлении небольших партий изделий разных типов целесообразно применение корпусных или комбинированных головок. Последние можно отнести к головкам универсальной конструкции; такая головка позволяет производить быструю переналадку сменных деталей с одного изделия на другое. Например, для перехода с трубообразного профиля на сплошной возможна простая замена дорнодержателя с дорном на проставочное кольцо с внутренним диаметром равным внешнему диаметру канала дорнодержателя (рис. 6.3).

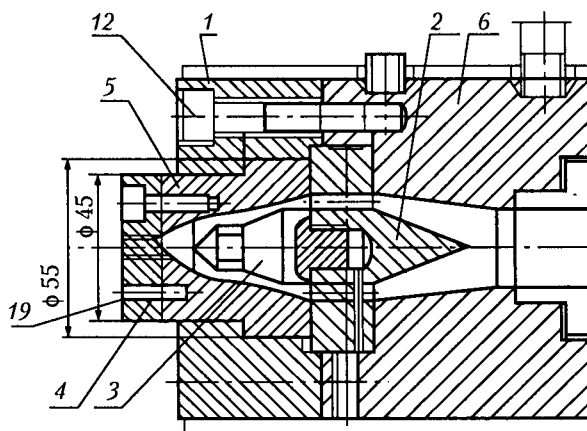


Рис. 6.3. Конструкция комбинированной экструзионной головки:

1 — фланец; 2 — рассекатель; 3 — дорн-заглушка; 4 — фильера; 5 — корпус фильеры; 6 — корпус головки; 12 — винт крепежный; 13 — штифт

Можно также при сохранении дорнодержателя заменить дорн на коническую заглушку подходящих размеров, как показано на рис. 6.3. В некоторых случаях такая замена облегчает формование заготовки необходимой формы и способствует более равномерному выдавливанию расплава из фильеры.

6.2. Рекомендации по конструированию головок

6.2.1. Способы крепления головок к цилиндру экструдера

Экструзионная головка должна быть прикреплена к цилиндру экструдера. Способ крепления должен обеспечивать прочное и плотное соединение, предотвращающее утечки расплава при высоком давлении на входе в головку, быструю и удобную установку и смену как головки в целом, так и некоторых ее комплектующих (нагревателей, термопар, центрующих втулок, формирующих деталей).

Экструзионная головка может соединяться с цилиндром экструдера при помощи резьбы или различных затворов. Наиболее распространенными являются разъемное хомутовое соединение и фланцевое соединение с откидными болтами.

6.2.1.1. Разъемный хомут

На рис. 6.4 показано хомутовое соединение головки с цилиндром одношнекового экструдера.

Хомутовое соединение требует соблюдения точных размеров промежуточных деталей. Так как стяжка деталей цилиндра и головки производится по коническим поверхностям, то центрующая втулка на входе в головку должна обеспечить уплотнение по торцам обеих соединяемых деталей. При длинной втулке хомут трудно или невозможно закрыть, при короткой не будет обеспечено уплотнение по торцам, и головка будет подтекать.

Разъемный хомут для крепления небольших головок представляет собой самостоятельный узел, который не является ни принадлежностью цилиндра экструдера, ни деталью экструзионной головки. На некоторых экструдерах он выполнен в качестве постоянной принадлежности цилиндра, поскольку прикреплен к нему неподвижной частью винтами.

Для присоединения к цилиндру головка вставляется в раскрытый хомут и затягивается откидными болтами. Такое крепление позволяет быстро и без особых усилий установить даже тяжелую головку при наличии устройства для регулирования положения головки. Подобная конструкция крепления головок часто применяется на экструдерах средних размеров.

6.2.1.2. Фланцевое соединение с откидными болтами

Фланцевое соединение с откидными болтами требует в зависимости от размеров и конструкции откидного фланца четырех–восьми болтов. Распределение прижимного усилия между болтами при затяжке зигзагом позволяет сравнительно легко обеспечить надежное уплотнение между головкой и цилиндром. В настоящее время фланцевое присоединение головок применяется чаще других, особенно для головок сред-



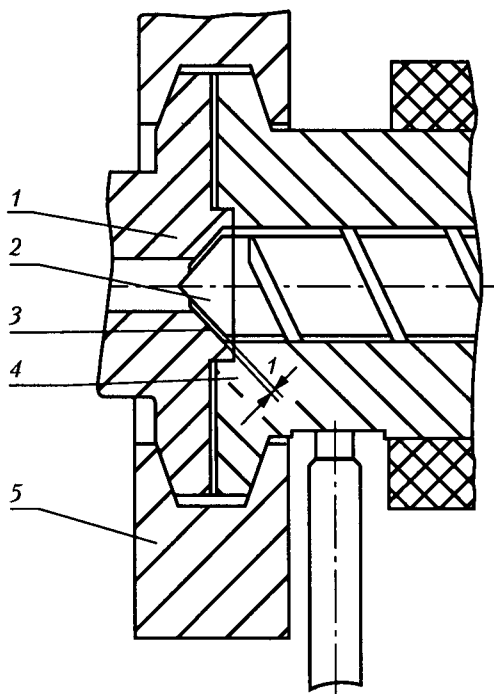


Рис. 6.4. Хомутовое крепление экструзионной головки:

1 — адаптер (или корпус головки); 2 — шnek; 3 — зазор между шнеком и поверхностью адаптера; 4 — цилиндр экструдера; 5 — разъемный хомут

него и большого размеров. При использовании фланцевого соединения возможны различные варианты установки головки и конструкции адаптера.

6.2.1.3. Адаптеры

Адаптер представляет собой деталь, с помощью которой головка соединяется с цилиндром экструдера. На рис. 6.5 показан пример установки головки с помощью откидного фланца и центрующей втулки.

В данном случае адаптер имеет резьбу на конце, и головка вворачивается в резьбовое отверстие фланца головки. Совпадение пазов под откидные болты фланцев на цилиндре и головке обеспечивается неподвижной центрующей втулкой 5, относительно которой может поворачиваться головка целиком. Вкручивать головку в неподвижный фланец, особенно тяжелую, не всегда удобно и возможно, проще навернуть на резьбовой конец корпуса кольцо или втулку. Для этого во фланце головки должна быть цилиндрическая впадина под кольцо или выступ втулки. На рис. 6.6 показана конструкция головки с резьбовым адаптером, на который наворачивается втулка.

Использование откидывающегося фланца и адаптера с наворачивающейся резьбовой втулкой наиболее удобно, поскольку при этом вращается не тяжелая головка, а относительно небольшая втулка, которую наворачивают на хвостовик головки со стороны цилиндра.

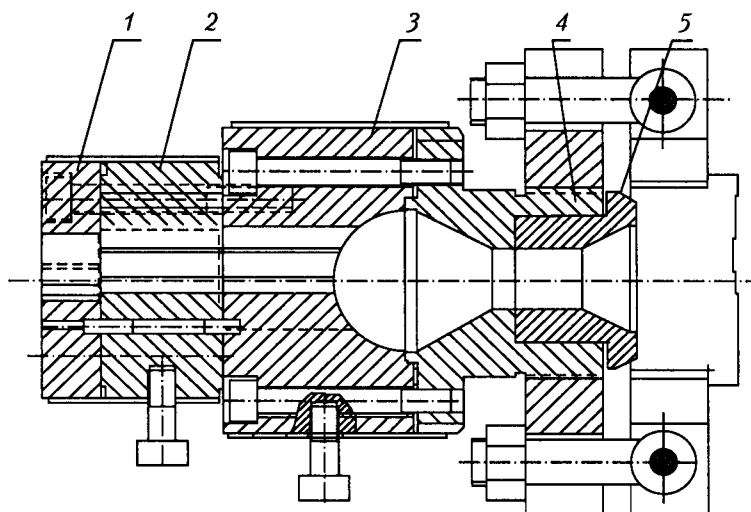


Рис. 6.5. Фланцевое соединение экструзионной головки с цилиндром экструдера:
1 — фильера; 2 — бленда; 3 — корпус; 4 — адаптер; 5 — центрующая втулка

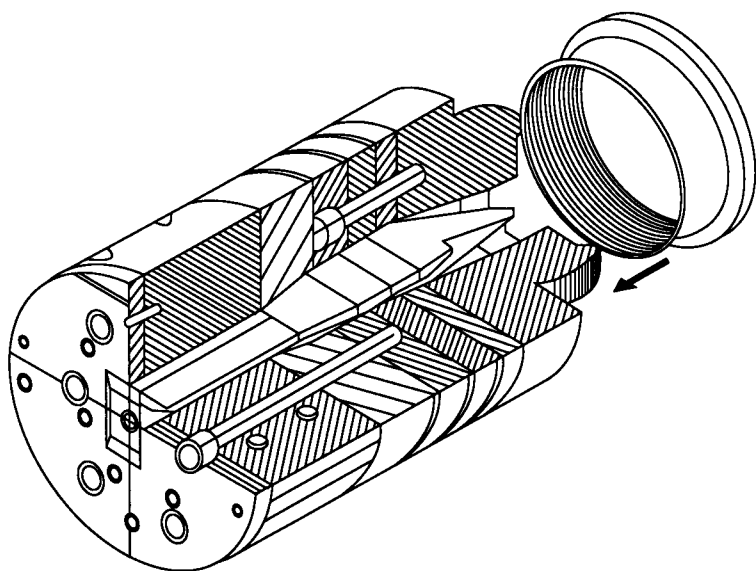


Рис. 6.6. Экструзионная головка с наворачивающейся резьбовой втулкой для фланцевого крепления головки [4]

Выбор способа крепления головки к экструдеру зависит от многих факторов, прежде всего от конструкции крепежной части на цилиндре, габаритов и конструкции головки, удобства ее сборки и установки и т. д. Надо принимать во внимание, что при необходимости быстро демонтировать головку все операции производятся с горячими деталями, и в головке остается расплав. Металлоемкая головка остывает медленно, и материал, особенно нетермостабильный, без течения может разрушаться, поэтому при демонтаже головку предварительно остужают сжатым воздухом на 30–50 °С ниже рабочих температур. Сильнее остужать головку не следует, так как быстрое затвердевание материала в ней затруднит чистку деталей, особенно если чистка производится вручную, а некоторые детали неразъемные.

6.2.1.3. Центрирующие втулки

Для обеспечения возможности установки головки на другой тип экструдера в адаптер обычно вставляют переходную втулку, которая обеспечивает плавный переход от отверстия в цилиндре экструдера к корпусу головки. Такую втулку часто называют центрирующей, так как она соединяется с цилиндром по посадке, обеспечивающей минимальную несоосность отверстий (рис. 6.5). Соединение головки с экструдером возможно и без центрирующей втулки, как показано, например, на рис. 6.4, но при переходе на другой экструдер возникают проблемы с привязкой головки. Поэтому вариант с центрирующей втулкой более удобен.

Иногда между шнеком и корпусом головки для создания дополнительного сопротивления и фильтрации расплава устанавливают решетки с набором сит. Решетка представляет собой цилиндрическую плиту толщиной 10–30 мм с отверстиями Ø2–5 мм по всему рабочему сечению. Отверстия располагаются по концентрическим окружностям либо в шахматном порядке; со стороны входа отверстия раззенковывают для исключения плоских застойных участков. Иногда для обеспечения более равномерного входа материала в головку отверстия по периферии делают большего диаметра, чем в центре. При переработке нетермостабильных материалов решетки обычно стараются не применять.

Форма канала центрующих втулок зависит от формы и размеров наконечника шнека (шнеков). При коническом наконечнике канал может быть коническим, цилиндрическим или комбинированным. При сферическом наконечнике шнека и установке решетки на входе в головку вход в решетку может быть также сферическим или плоским. Близко располагать конец шнека к решетке не рекомендуется, особенно при сферических наконечниках, поскольку в тонком зазоре будут развиваться большие скорости сдвига и расплав будет перегреваться [5].

При коническом наконечнике и коническом входе в головку углы конуса должны быть либо одинаковыми, либо вход в головку должен быть более плавным (с меньшим углом конуса). При переработке нетермостабильных материалов углы входа в голову следует принимать не более 60°.

6.2.2. Компоновка деталей головки

В простейшем случае экструзионная головка состоит из 4-х участков по ходу движения расплава: присоединительного адаптера 1, цилиндрического или расширяющегося

переходного участка 2, сужающегося участка 3, образующего зону входа в фильеру и призматический формующий участок 4 с постоянными размерами сечения (рис. 6.5).

Головки для производства полых, трубообразных или камерных профилей, помимо названных четырех участков, имеют участок расширения 5 и участок дорнодержателя 6 (рис. 6.6).

Как уже упоминалось выше, по способу соединения деталей головки разделяют на корпусные, блендовые и смешанные. В корпусных головках небольшого размера фильера и дорнодержатель устанавливаются в массивном корпусе головки. Прижим фильеры к торцевым поверхностям корпуса или дорнодержателя осуществляется с помощью прижимных гаек или фланцев. При неплотном прижме деталей в корпусе могут наблюдаться утечки расплава, а в головках с дорном может закупориваться расправом отверстие для подачи воздуха.

В глубоких корпусных головках трудно хорошо притереть сопрягаемые торцевые поверхности и поддерживать их в чистом состоянии при эксплуатации.

Недостатки корпусных головок устраняются в головках комбинированной конструкции (рис. 6.3). В них разъем деталей производится по торцевым плоскостям дорнодержателя, поэтому детали можно хорошо притереть и надежно стянуть при сборке. Головки такого типа в настоящее время применяются наиболее широко, особенно для производства труб и трубообразных профилей.

В головках блендового типа (рис. 6.1) прямоугольные плиты или цилиндрические шайбы соединяются между собой болтами. Для обеспечения совпадения контуров сопрягаемых деталей применяются штифты, установочные винты, цилиндрические или прямоугольные выступы. Для корректировки неточности изготовления контуров в местах сопряжения допускается на входе и выходе деталей выполнять фаски шириной 1–2 мм. В зависимости от размеров деталей и конструкции головки бленды соединяются между собой блоками по 2–3 детали, либо крепежные болты притягивают к корпусу сразу несколько деталей (рис. 6.5, 6.6).

Блендовые головки проще в изготовлении, в сборке и разборке, однако места соединения деталей постепенно срабатываются и уплотнение нарушается, особенно если контакт осуществляется по всей плоскости сопрягаемых деталей. Небольшие выступы (0,5–1 мм) по контуру отверстия, по которым детали притирают, обеспечивают более продолжительную эксплуатацию деталей головки при плотном стыке; в этом случае отпадает необходимость шлифовки всей торцевой поверхности детали.

Конструкция дорнодержателя в головках для изготовления полых или камерных профилей зависит от формы и размеров профиля и общей конструкции головки. На рис. 6.7 показана схема блендовой головки с дорнодержателем для изготовления камерного секционного профиля. Для ускорения доводки головки фильерная часть выполнена со съемным вкладышем, который легче доработать, чем всю фильеру в целом.

6.2.2.1. Формующая часть (фильера)

Равномерное выдавливание расплава по сечению формующего канала в значительной мере зависит от расположения формующей щели относительно оси экструзии. Кроме того, при выборе положения щели на фасаде фильеры необходимо учитывать способы калибрования, охлаждения и отвода профиля тянущим устройством, габариты профиля, способ резки профиля, возможность установки в линию агрегатов

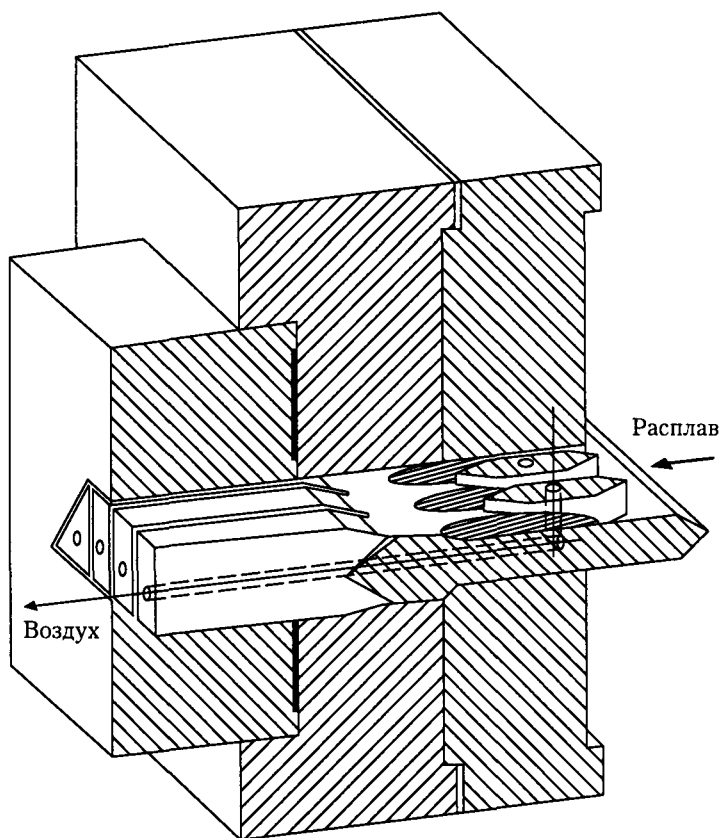


Рис.6.7. Схема блендовой головки с дорнодержателем [5]

дополнительной механической обработки профиля (например, перфорирование, нанесение печати, маркировки, а также способ упаковки).

В тех случаях, когда по условиям работы комплектующего оборудования возможно различное размещение формующего отверстия, рекомендуется руководствоваться следующими правилами:

- при изготовлении широких профилей формующую щель располагать горизонтально;
- расположение формующего отверстия согласовывать с конструкцией калибрующего устройства и учитывать удобство заправки экструдата в калибратор при запуске; обычно профиль располагают сверху развитой поверхности (с поднутрениями, выступами, ребрами);
- во избежание ошибок при проектировании фильер и калибраторов для нестандартных профилей согласование расположения отверстий следует проводить при взгляде на торец головки через калибратор, а именно со стороны выхода из него;

- для калибраторов с откидывающимися крышками, прикрепляемых к основанию на петлях, необходимо учитывать левое или правое расположение калибратора и комплектующего оборудования относительно экструзионной головки; полезно при проектировании составить примерную технологическую схему процесса и примерное поперечное сечение калибратора с калибруемым профилем;
- определить, как будут центроваться между собой детали крышки и основания калибратора, и прорисовать траектории положения крышки при откидывании; конструкция деталей центровки не должна препятствовать легкому перемещению блока крышки;
- во избежание деформации профиля в тянущем устройстве профиль располагают так, чтобы усилия прижатия находились в плоскости наибольшего сопротивления изделия;
- при изготовлении открытых П-образных, Ш-образных и других корытообразных профилей расположение формующей щели полками вверх или вниз зависит от применяемой схемы калибрования, зазоров между деталями калибратора, теплофизических свойств материала, а также коэффициентов трения расплава о металл; при калибровании и охлаждении изделий в открытой водяной ванне фильеру следует располагать полками вниз во избежание перетекания воды по желобу профиля к горячей головке, что вызовет нарушение процесса;
- при отводе некоторых типов профилей (например, трубы квадратного сечения) роликовым тянущим устройством возможно расположение формующего отверстия и калибра по диагонали; в этом случае увеличивается поверхность сцепления роликов с трубой и уменьшается опасность проскальзывания профиля между роликами.

На положение формующего отверстия могут влиять сразу несколько факторов, и при конструировании экструзионной головки необходимо привязываться к конкретному оборудованию и выбирать оптимальный вариант расположения формующего отверстия.

Формующие детали, образующие фильеру, можно выполнять разъемными или неразъемными. Разъемные детали имеют доступ ко всем рабочим поверхностям, что позволяет их тщательно очищать и доступными способами обрабатывать при необходимости доводки формы или размеров канала. Неразъемные детали проще в изготовлении, особенно при современных способах электроэрозионной обработки. Выбор конструкции формующего инструмента необходимо увязывать с планируемым способом изготовления деталей.

Для разъемных фильер число разъемов и их расположение определяют конкретно для каждого изделия. При этом рекомендуется:

- число разъемов делать минимальным, но достаточным для обеспечения возможности обработки формующих поверхностей и для очистки их от материала при разборке головки;
- для уменьшения переустановок и сокращения затрат на обработку желательно выполнять разъемы в одной плоскости (примеры разъемных конструкций фильер показаны на рис. 6.8);

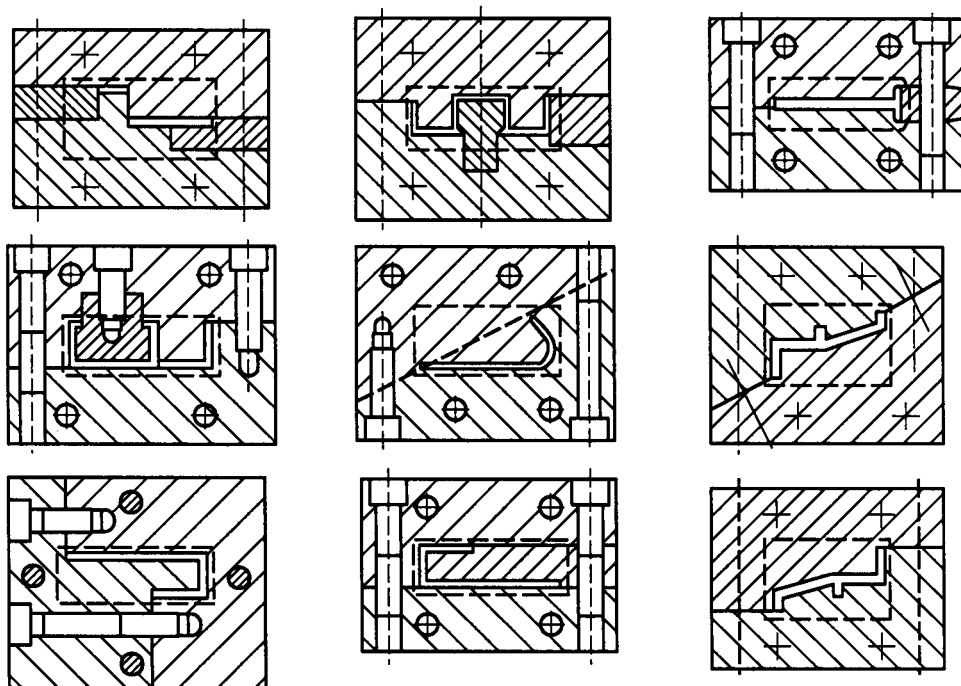


Рис. 6.8. Примеры разъемных фильер [2]

- плоскости разъема следует по возможности располагать так, чтобы стыки не попадали на лицевую сторону изделия, так как в местах стыка на изделии могут оставаться заметные следы; лучше всего располагать линии стыка на углах;
- для точного совмещения разъемных деталей друг с другом в плоскостях разъема следует устанавливать штифты $\varnothing 6-8$ мм (для малогабаритных деталей $\varnothing 5$ мм) длиной 5–7 мм и с фаской на конце; штифты следует выполнять с твердостью HRC 36–42;
- для изделий, имеющих в поперечном сечении «замок» или близко расположенные стенки, в формующих деталях следует разводить эти стенки для предотвращения сваривания участков экструдата на выходе из головки (рис. 6.9); сближение до рабочего состояния — в калибраторе, не допуская сваривания кромок путем установки тонких охлаждаемых вставок;
- для изготовления изделий с минимальными радиусами в углах в фильерах следует расширять каналы по краям (рис. 6.10); чем выше упругость расплава, тем больше величина расширения; расширение канала должно быть без резких переходов и ступенек, иначе на экструдате образуются риски и полосы;
- каналы с разной высотой формующей щели следует отделять друг от друга то-

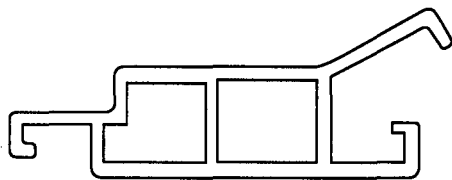


Рис. 6.9. Форма отверстия фильеры для экструзии профиля с близко расположенными стенками [5]

стоянии 2–5 мм от выхода острым концом, чтобы обеспечить сварку разделенных перегородкой потоков; большие значения принимаются для более пластичных материалов — ПВХ, АБС, ПММА и пр.);

- при установке разъемных формующих деталей в конусной обойме конусность наружной поверхности должна быть не менее 1:5 для обеспечения легкой распрессовки деталей.

На внешней поверхности последовательно соединяемых деталей головки следует предусматривать монтажные зазоры под отвертку или специальную пластину толщиной 2,5–3 мм и глубиной 5–10 мм для быстрого разъединения деталей при демонтаже.

6.2.2.2. Подводящие каналы

Подвод расплава к формующему каналу фильеры осуществляется плавно в головках обтекаемой конструкции или сравнительно резко в блендовых головках. Каналы, по которым расплав перетекает к формующей части, называются подводящими, чаще всего они имеют переменное в направлении течения сечение.

Назначение подводящих каналов состоит в преобразовании формы потока от сравнительно простой на входе (круглой, прямоугольной, овальной) к фигурной в месте стыка с формующей частью. В подводящих каналах происходит формирование профиля скоростей элементов потока, от которого зависит равномерность выхода расплава по ширине формующего канала.

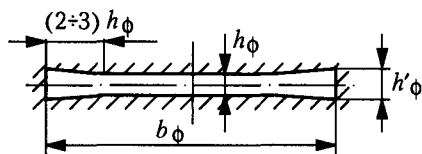
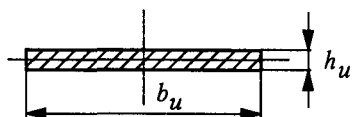
Форма и размеры подводящих каналов оказывают непосредственное влияние на качество экструдированной заготовки (состояние поверхности, степень изменения формы и размеров по отношению к формующей щели), особенно при высоких скоростях экструзии.

«Обтекаемые» подводящие каналы должны удовлетворять условиям:

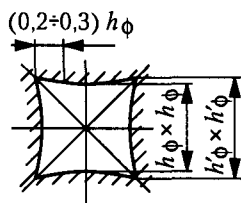
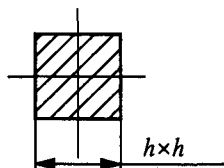
- обеспечение плавного перехода к формующему каналу сложного поперечного сечения, особенно при переработке нетермостабильных материалов;
- отсутствие застойных («мертвых») зон, где может произойти застой и перегрев материала;
- площадь поперечного сечения канала должна плавно уменьшаться (в некоторых головках для уменьшения разбухания экструдата стараются выдержать площадь поперечного сечения постоянной, не допуская растяжения расплава);
- образующие каналов могут быть прямолинейными или криволинейными в зависимости от конструкции деталей и применяемого способа обработки; по возможности, следует стремиться к наиболее простой форме каналов;

Изделие

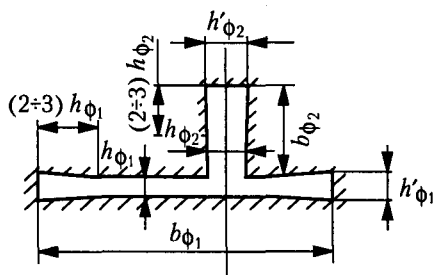
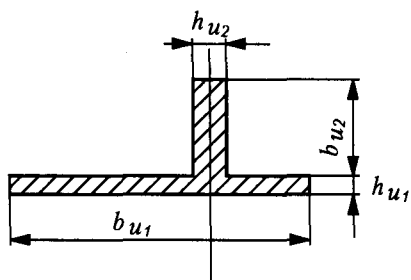
Фильера



$$h'_\phi = h_\phi + 0,1 \times 2$$

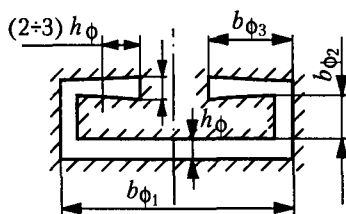
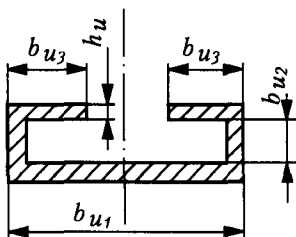


$$h'_\phi = h_\phi + 0,1 \times 2$$



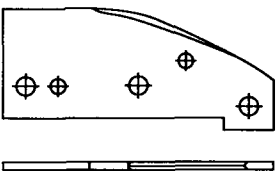
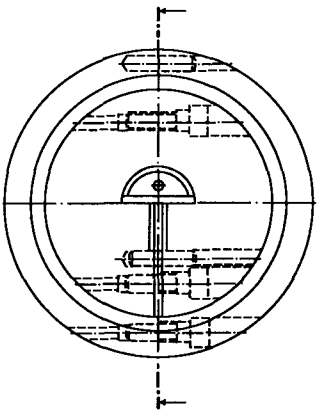
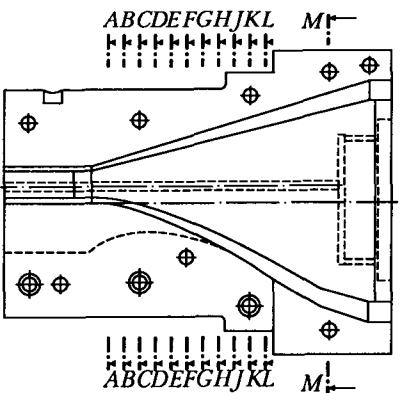
$$h'_{\phi 1} = h_{\phi 1} + 0,1 \times 2$$

$$h'_{\phi 2} = h_{\phi 2} + 0,1 \times 2$$



$$h'_\phi = h_\phi + 0,1 \times 2$$

Рис. 6.10. Форма и размеры канала для обеспечения одинаковой толщины стенок профиля и выравнивания скоростей течения по краям канала [2]



Section A-A



Section B-B



Section C-C



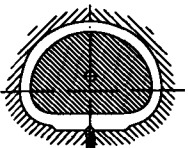
Section D-D



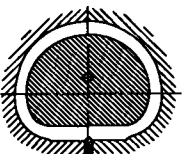
Section E-E



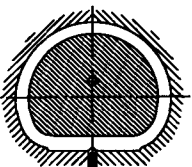
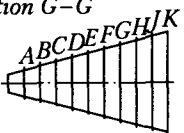
Section F-F



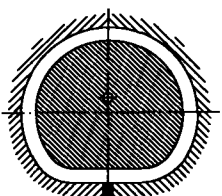
Section G-G



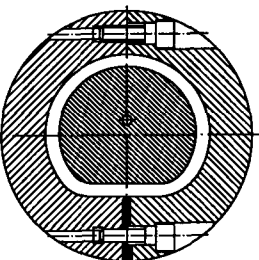
Section H-H



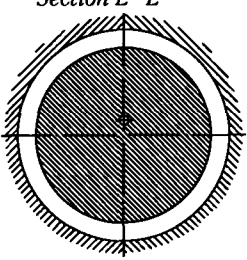
Section J-J



Section L-L



Section K-K



Section M-M

Рис. 6.11. Пример конструкции экструзионной головки с обтекаемыми каналами [6]

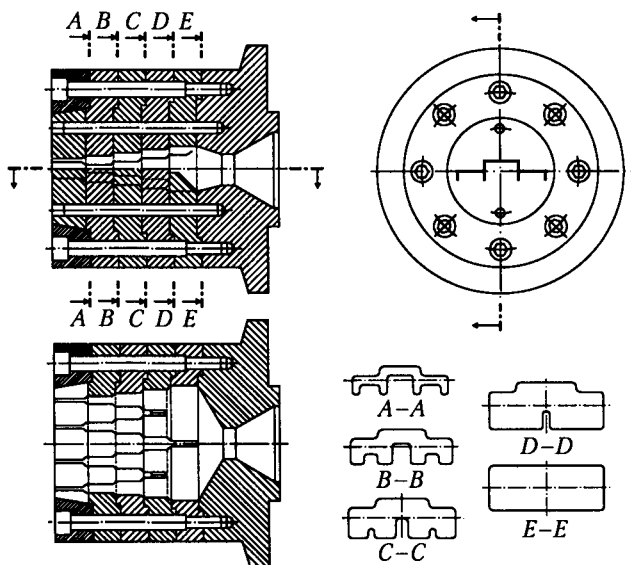


Рис. 6.12. Схема «ступенчатой» блендовой головки [6]

- поверхности подводящих каналов должны образовываться путем подбора более легко осуществимых машинных операций (плоскостей, поверхностей вращения — для разъемных деталей; прожига фигурными электродами — неразъемных деталей).

Увеличенная длина входной зоны способствует более спокойному и равному подводу расплава к формующей части фильеры. Для нетермостабильных материалов углы наклона прямолинейных образующих каналов не должны превышать для криволинейных образующих оптимальной формой считается сигмоидальный профиль (кубическая парабола), который при обработке может быть заменен короткими прямолинейными образующими. На рис. 6.11, 6.12 приведены примеры конструирования обтекаемой экструзионной и ступенчатой блендовой головок.

6.2.3. Нагревательные элементы и датчики температуры и давления

Для нагрева и поддержания определенной температуры расплава экструзионной головки снабжаются нагревательными элементами и датчиками теплового контакта. Чаще всего используют бандажные (ленточные) электронагреватели. Они представляют собой спирали из ленточного нихрома, намотанного на жаропрочный изоляционный материал. Такие нагреватели наиболее компактны и надежны в эксплуатации.

Иногда для нагрева цилиндрических деталей используют специальный нагревательный провод, представляющий собой нихромовую проволоку в теплоустойчивой изоляции. Проводом обматывается деталь, а выводы подключаются к источнику электрического тока. Под провод целесообразно устанавливать тонкую изолирующую

прокладку, например, из полиамидной пленки, предотвращающей пробой изоляции на корпус. Для этой же цели провод следует наматывать с некоторым шагом и провод сверху закрывать защитной изоляцией; подключение провода к источнику напряжения производится через керамические клеммники.

Применение нагревателей из нихромовой проволоки в керамических бусах не рекомендуется, так как такие нагреватели непрочные, через зазоры между бусами возможны электрические замыкания. Их, при необходимости, можно использовать как стационарные нагреватели, уложенные в пазах деталей головки.

В качестве токонесущего проводника (сопротивления) используется лента высокоомического сопротивления из жаростойкого сплава инконел-У451СО.

позволяет обеспечить высокую точность поддержания значения измеряемого параметра [9]. Конструктивно прибор выполнен в пластмассовом корпусе с габаритами $96 \times 96 \times 160$ мм.

Принцип работы прибора состоит в высокоточном измерении напряжения, пропорционально измеряемому параметру, преобразования этого значения в частоту и обработке однокристалльным микроконтроллером. Прибор с датчиком типа ТХК в диапазоне до 750°C позволяет поддерживать точность регулирования до $0,1^\circ\text{C}$. Для достижения такой точности прибор нужно соответствующим образом настроить, а горячий спай датчика располагать в корпусе нагреваемой детали таким образом, чтобы уменьшить инерционность нагрева.

В зависимости от габаритов корпуса головки длина рабочей части термопары принимается равной 40, 60, 100 мм. Обычно спай располагают на глубине 10–20 мм от поверхности нагревателя. При глубоком положении датчика (например, вблизи канала головки), где температура выше, регулирование будет осуществляться по величине этого показателя, в то время как поверхность головки может в это время уже частично остыть; при положении спая датчика вблизи нагревателя может наблюдаться обратная картина.

В настоящее время для поддержания высокой точности регулирования и снижения инерционности срабатывания схемы регулирования параллельно для каждой зоны нагрева устанавливают по два датчика, один из которых расположен вблизи канала головки, а другой — вблизи нагревателя. Регулирование в этом случае осуществляется по средней температуре нагрева и инерционность срабатывания схемы регулирования уменьшается [10].

Часто для контроля состояния расплава в головке используют датчики температуры и давления расплава. Использование сведений об этих параметрах позволяет более оперативно и целенаправленно управлять технологическим процессом. Зарубежные и отечественные экструдеры не комплектуются датчиками температуры и давления расплава при стандартной поставке, но могут оснащаться ими по желанию потребителя.

Для контроля температуры расплава на выходе из формующей щели можно использовать переносные игольчатые термопары с цифровым прибором либо малогабаритные изолированные термодатчики, устанавливаемые стационарно в корпус фильеры так, чтобы расстояние между стенкой рабочего канала и спаем датчика не превышало 1–1,5 мм; при этом спай датчика должен плотно касаться металла детали.

Для измерения давления расплава в головке широко используются мембранные датчики фирмы *Dynisco*, США, и других производителей, в том числе и отечественных, например, датчики фирмы «Теплоприбор», Москва.

Датчики температуры и давления расплава располагаются непосредственно в канале головки, поэтому они должны быть малогабаритными, чтобы не нарушать процесс течения расплава и не вызывать застой материала на датчике, особенно это важно для нетермостабильных материалов.

6.2.4. Изготовление и ремонт деталей экструзионных головок

Для изготовления формующих деталей применяют нержавеющие и инструментальные стали следующих марок: 20Х, 40Х, 40Х13, У8, У10.

Поскольку корректировка основных деталей в процессе отработки технологического процесса неизбежна даже в случае сравнительно простых профилей, рекомендуется задавать начальную твердость не выше 30–32 HRC. И только после окончательной доводки формы и размеров формующих каналов можно производить окончательную термообработку с твердостью рабочей поверхности 46–50 HRC.

Для уменьшения времени на обработку деталей иногда рекомендуют изготавливать два комплекта формообразующих деталей, один из которых подвергается доводке, а второй обрабатывают уже в окончательном виде по образцу после завершения доводочных операций.

Внутренние (рабочие) поверхности формующих деталей выполняются с чистой обработкой 0,32 мкм. Поверхности всех остальных деталей, соприкасающихся с расплавом, рекомендуется выполнять с чистотой обработки не ниже 0,63 мкм.

Для исключения коррозии деталей из инструментальных сталей рекомендуется их хромировать или химически никелировать даже при переработке термостабильных материалов. Хромирование, к тому же, придает поверхностную твердость при сохранении высокой пластичности детали в целом, что важно для возможной ее доработки; на твердой поверхности проще достичь высокой чистоты обработки. Для переработки материалов, вызывающих коррозию (например, ПВХ), обязательно защитное покрытие деталей или использование нержавеющей сталей.

6.3. Расчет экструзионных головок

Для уменьшения времени и финансовых затрат на доводку оснастки при проектировании экструзионных головок для изготовления профильных изделий нужно выполнить хотя бы элементарный расчет каналов головок.

Какие же расчеты следует выполнить?

Прежде всего, необходимо выполнить расчет исполнительных размеров каналов фильеры и сопрягаемых с ней деталей. Этой операции должен предшествовать выбор конкретного оборудования из имеющегося в наличии парка машин, приблизительный прогноз производительности процесса, определение способа калибрования и примерной его конструкции, прорисовка чернового варианта экструзионной головки в привязке к выбранному экструдеру. Эти вопросы рассмотрены в главе 2.

В главе 4 показано, что форма и размеры канала фильеры могут отличаться (иногда весьма существенно) от формы и размеров экструдированного профиля вследствие специфики течения и деформирования вязкоупругих неньютоновских жидкостей, к которым относится большинство расплавов полимеров.

6.3.1. Размеры канала фильеры

Сложный характер трехмерного деформирования расплава в каналах (одновременный сдвиг и растяжение), например, прямоугольный или кольцевой формы, приводит к неоднородному и неодинаковому разбуханию экструдата по ширине и толщине (или по диаметру и толщине стенки). При вытяжке относительное изменение размеров экструдата также неодинаково, что вызывает проблемы при получении изделий заданных размеров.

В большинстве случаев при расчете размеров каналов формующего инструмента используются практические рекомендации [5, 6, 11–22]. Многие рекомендации противоречивы, поскольку основаны на опыте конкретных производителей и не имеют обобщений. В табл. 6.1–6.4 приведены рекомендации по изменению размеров фильеры по отношению к номинальным размерам профилей при экструзии профилей из различных термопластов.

Таблица 6.1. Коэффициенты увеличения линейных размеров [1]

Материал	Коэффициенты увеличения линейных размеров фильеры ¹
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	1,15
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	1,15
Полистирол и его сополимеры (ПС)	1,10
Найлон (ПА)	1,20
Ацетобутират целлюлозы (АЦБ)	1,10
Поливинилхлорид непластифицированный (НПВХ)	1,10
Поливинилхлорид пластифицированный (МПВХ)	1,15

¹ Предполагается, что все линейные размеры экструдата (ширина, высота, толщина стенки) при вытяжке изменяются одинаково.

Таблица 6.2. Размеры формующего инструмента при экструзии различных термопластов [1]

Материал	L/H	H/h
Пластифицированный ПВХ	6–9	0,85–0,90
Жесткий ПВХ	20–70	1,0–1,1
ПЭНП	16	0,85–0,90
АЦ	20	0,75–0,90
ПЭВП	20	1,0–1,1

Примечание. L — длина формующей части фильеры; H — высота щелевого зазора фильеры; h — толщина стенки изделия.

Таблица 6.3. Рекомендации по изменению размеров формующего инструмента при экструзии некоторых термопластов [1]

Материал	Ширина щели, %	Высота щели, %	Относительная длина, $L : h$
АЦ	+12	+30	10 : 1
АЦБ	+10	+20	8 : 1
ЭЦ	–10	+20	5 : 1
ПС	–12	+13	14 : 1
ПВХ	–12	+3	6 : 1

Таблица 6.4. Приращение размеров формующего инструмента при экструзии профильных изделий из некоторых термопластов [6, 14–22]

Материал	Ширина B , %	Высота H , %	Высота формующего зазора H_f , %	Длина формующей части L_f , мм
Первоначально для любых материалов	+20	+35	Профиль с одинаковой толщиной стенок участков +20	25–38
Пластифицированный ПВХ (МПВХ)	+20	+30	Толщина стенок одинаковая +12,5	25–38
			Профили с различной толщиной стенок участков +13	25–38
Жесткий и полужесткий ПВХ	+1	+1	+1,1	13
Полиэтилен (ПЭ)	+10	+15	0 (определяется после пробного пуска)	–
Ацетат целлюлозы (АЦ)	+20	+20	–10 и выше для больших	25–38
Ацетобутират целлюлозы (АЦБ)	+20	+20	толщин стенок изделия	
Полистирол (ПС)	+20	+20	–	25–38

При экструзии калибруемых профилей из жесткого ПВХ размеры оснастки рассчитывают, исходя из следующих соотношений [5]:

- ширина щели калибратора : $B_k = 1,01b + h/2$;
- высота зазора (калибрование с одной стороны) $H_k = 1,20h$;
- длина «сухого» калибратора около 600 мм;
- ширина щели фильеры $B_f = 1,05B_k$ (для размеров более 30 мм);
- $B_f = 1,10 B_k$ (для размеров до 30 мм);
- высота зазора щели $H_f = 0,9h$ (для жесткого ПВХ);
- $H_f = 0,8h$ (для ударопрочного ПВХ);
- длина формующей части $L_f = 35...40H_f$.

Приведенные рекомендации полезны для практического использования, поскольку они являются обобщением опыта работы на разных материалах, но они не дают ответа, почему так происходит. Кроме того, в разных источниках рекомендации расходятся даже по одинаковым типам материала. В работах [23–33] этот вопрос был исследован специально. Действительно, при формовании профилей из расплава изменение размеров неодинаково, что является следствием сложного характера течения расплавов полимеров в каналах экструзионных головок и его влияния на анизотропию деформаций экструдата. Эти вопросы рассмотрены в главе 4.

Проведенные исследования позволили установить особенности течения и деформирования некоторых промышленных марок термопластов и дать расчетные форму-

лы для определения размеров поперечных сечений формующих каналов различной геометрии при экструзии изделий, получаемых как без применения калибрования экструдата, так и для различных методов калибрования.

6.3.2. Размеры формующего канала при экструзии некалибруемых профилей

Расплав полимера на выходе из формующей щели разбухает. В общем случае деформация разбухания трехмерна: сжатие в направлении оси течения ϵ_1 и расширение перпендикулярных направлениях ϵ_2 и ϵ_3 . При $B_f > H_f$ (или $D_f > H_f$) ϵ_2 и ϵ_3 неодинаковы. При последующей вытяжке элемент экструдата будет удлиняться в продольном направлении и сокращаться в поперечных. Поскольку увеличение размеров за счет разбухания экструдата и их сокращение за счет вытяжки происходит одновременно, то истинные размеры профиля определяются соотношением деформаций. Для заготовки круглой или квадратной формы относительное изменение поперечных размеров одинаково: $\epsilon_2 = \epsilon_3$. На основе анализа объемного характера деформирования экструдата, учитывающего разбухание и вытяжку расплава, получены формулы для расчета размеров поперечного сечения формующего инструмента [23]:

- для канала круглого поперечного сечения:

$$d_f = d\sqrt{\lambda}; \quad (6)$$

- для канала прямоугольного поперечного сечения:

$$\begin{aligned} B_f &= B \lambda_s^{v_b - a_{sb}} \lambda^{v_b}; \\ H_f &= \frac{F_f}{B_f} = \frac{F \lambda}{B_f}; \end{aligned} \quad (6)$$

- для канала кольцевого поперечного сечения:

$$\begin{aligned} H_f &= \frac{H}{\lambda_s^{v - a_{pb}}} \lambda^{1 - v_b}; \\ D_f &= \frac{H}{H_f} (D - H) \lambda + H_f, \end{aligned} \quad (6)$$

где λ — степень вытяжки экструдата; λ_s — коэффициент разбухания по площади поперечного сечения; v_b — постоянная материала; a_{sb} — показатель интенсивности поперечной деформации для большего размера при разбухании; B_f , D_f , H_f — ширины, диаметр и высота формующего зазора прямоугольных и кольцевых каналов соответственно; B , D , H — соответствующие размеры участков профильного изделия; F — площадь поперечного сечения профиля.

Величина разбухания экструдата λ_s зависит от эластических свойств материала, геометрии канала, скорости и температуры течения расплава. Поскольку при течении вязкоупругой жидкости на любой ее элемент постоянно действуют деформационные (сдвиг, растяжение) и релаксационные (уменьшение обратимых деформаций за счет снижения напряжений во времени при действии высокой температуры) процессы, то результирующая величина высокоэластической деформации к выходу из канала (и соответственно разбухание экструдата) должна учитывать влияние этих конкурирующих процессов. Обычно величину разбухания связывают со скоростью сдвига при течении в канале заданной геометрии. Такие зависимости, как правило, неинвариантны и привязаны к размерам канала. Связь между разбуханием и напряжением сдвига на стенке канала не зависят от размеров формующего инструмента, но для расчета разбухания необходимо знать давление в головке. Поскольку по длине головки давление падает, то задача расчета разбухания через напряжения сдвига становится неопределенной, так как неизвестно истинное падение давления по длине каждого из последовательных каналов.

При обработке экспериментальных данных по разбуханию в зависимости от отношения скорости сдвига (деформационный фактор) к гидравлическому сопротивлению канала (релаксационный фактор, поскольку он содержит длину канала, а следовательно, и время течения) они с достаточной для практики точностью могут быть описаны единым степенным уравнением:

$$\lambda_s = \lambda_{s1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{W_f} \right)^A, \quad (6.4)$$

где λ_{s1} , A — характеристики эластических свойств расплава для заданной температуры экструзии.

Величина λ_{s1} характеризует разбухание экструдата, если выражение в скобках равно 1.

Преобразование значений скорости сдвига и сопротивления для круглых, прямоугольных и кольцевых каналов дает расчетные формулы, в которые входят все известные величины:

- для круглого канала

$$\lambda_s = \lambda_{s1} \left(\frac{Q}{4L_f / D_f} \right)^A; \quad (6.5)$$

- для прямоугольного и кольцевого каналов

$$\lambda_s = \lambda_{s1} \left(\frac{Q}{2L_f / H_f} \right)^A. \quad (6.6)$$

Объемный расход Q одинаков в любом месте по длине головки в силу сплошности потока (условие неразрывности), он легко определяется по массовому расходу и плотности расплава при заданной температуре.

Формулы (6.5) и (6.6) позволяют рассчитывать разбухание экструдата в зависимости от параметров процесса течения с приемлемой для практики точностью ($\pm 10\%$).

В табл. 6.5 представлены характеристики эластических свойств расплава для которых исследованных термопластов.

Показатель степени a_{sb} в формулах (6.2), (6.3) в общем случае не является константой, а зависит от размеров формирующего канала и геометрии входа в него [23–29–31, 33]. В зависимости от соотношения ширины щели и ее высоты (или средних

Таблица 6.5. Значения разбухания различных термопластов

Материал	Температура, °C	Плотность расплава, г/см ³	λ_{s1}	A
ПЭНП 15803-020	160	0,787	5,156	0,260
ПЭНП 102-14	160	0,790	4,047	0,193
ПЭНП 17702-010	160	0,787	1,746	0,010
ПЭВП 273-75	210	0,820	5,413	0,198
ПВХ пластифицированный, рецептура 1183	150	1,15	1,479	0,043
	170	1,07	2,198	0,081
	190	1,00	2,922	0,123
ПВХ пластифицированный, рецептура K21-H	150	1,15	1,951	0,092
	170	1,07	2,359	0,097
	190	1,00	1,783	0,029
ПВХ пластифицированный, рецептура 1184-A (антистатическая)	150	1,170	3,081	0,051
	160	1,020	4,523	0,204
	170	0,087	6,004	0,222
ПВХ пластифицированный, рецептура 1185-A (антистатическая)	140	1,020	2,100	0,259
	150	0,087	1,538	0,056
	160	0,078	2,266	0,095
ПВХ пластифицированный, рецептура 1611-A (антистатическая)	140	1,020	1,554	0,035
	145	0,940	1,668	0,032
	150	0,870	1,584	0,019
ПВХ жесткий, рецептура УВ-10	170	1,280	2,000	0,062
	180	1,250	2,000	0,062
	190	1,210	2,000	0,062
ПА «Компонор» (30% талька)	220	1,100	5,836	0,201
ПА6-ТА-20	230	1,050	4,373	0,163
Полисульфон ПС-500	230	НД	5,195	0,200
Полипропилен «Дал-лен» (импортный)	200	0,742	7,020	0,195
	210	0,739	7,020	0,195
АБС 2020-С	210	0,85	1,407	0,003
АБС 2802-36	200	0,97	1,656	0,041
	210	0,94	1,656	0,041
	220	0,93	1,656	0,041

Примечание. НД – нет данных.

Таблица 6.6. Значения показатели интенсивности разбухания по широкому размеру [29–31, 33]

Материал	Температура, °C	Параметры фильеры		a_{sb}
		B_f/H_f	L_f/H_f	
ПЭНП 17602-006	120–200	5,8–17,5	4,2–50	0,20
ПЭНП 17702-010	160	7,5	20	0,37
		12,5	20	0,27
		17,5	20	0,12
		17,5	20	0,08
ПЭНП 15802-020	160	17,5	20	0,21
ПЭВП 20306-005	200	17,5	20	0,40
ПЭВП 20307-016	200	7,5	20	0,31
		12,5	20	0,20
		5,8–17,5	20	0,20
		17,5	20	0,25
ПЭВП 20806-024	200	5,8–17,5	4,2–12,5	0,25
ПП 204-05-901	225	17,5	12,5	0,21
ПС общего назначения	200	5,8–17,5	4,2–12,5	0,35
УПС АТ (наполненный АІ)	200	7,5	20	0,40
ПВХ пластифицированный, рецептура 1183	170	7,5	20	0,45
	190			0,48
	150			0,48
	170	7,5	–	0,26
ПВХ-пластизоль Д-2А «ОС»	190		20	0,46
	150			0,50
	170	7,5	20	0,24
	190			
ПВХ пластифицированный, рецептура К-21Н	160			
	190			
	170			
ПВХ пластифицированный, рецептура 230	190	5,8–17,5	20	

диаметра и кольцевого зазора), а также относительной длины канала величина a_{sb} может изменяться в пределах от 0 до 0,5. В табл. 6.6 приведены значения a_{sb} для некоторых термопластов.

6.3.2.1. Степень вытяжки λ

Понятие степени вытяжки и ее определение через параметры процесса приведены в главе 4. Степень вытяжки, как уже упоминалось, характеризует продольную деформацию экструдата; чем выше λ , тем больше сужение экструдата и тем меньше поперечные размеры изделия. Диапазон рекомендуемых при экструзии профильных изделий значений степени вытяжки ограничен по ряду причин:

- величина вытяжки ограничена прочностью расплава при заданной температуре, поскольку при превышении критического значения продольной деформации

ции происходит разрыв экструдата; меньшую прочность расплава показывают пластичные материалы (композиции НПВХ, некоторые наполненные полимеры), высокую — расплавы полиолефинов, полиамидов; с повышением температуры прочность расплава возрастает;

- с увеличением степени вытяжки возрастает доля высокоэластической составляющей в полной деформации расплава; фиксирование обратимых деформаций при охлаждении приводит к образованию в изделии остаточных напряжений, к снижению теплостойкости изделия и увеличению продольной усадки при нагреве; для некоторых материалов величина равновесной усадки при прогреве выше T_c или $T_{пл}$ может достигать 75–80%, поэтому при выборе величины λ следует учитывать условия эксплуатации изделия и предполагаемый уровень остаточных напряжений, обусловленный высокоэластической деформацией.

На практике величину степени вытяжки обычно принимают в пределах 1,1–2. При $\lambda < 1,1$ трудно компенсировать некоторую неравномерность течения расплава в головках сложного поперечного сечения и искажение формы экструдата за счет разбухания. При $\lambda > 2$ сильно искажаются мелкие элементы профиля (риф, зубцы, радиусы округления) и в изделии накапливаются значительные остаточные напряжения от «замороженной» высокоэластической деформации. Чаще всего $\lambda = 1,2–1,5$. Для высоковязких формоустойчивых материалов (например, поливинилхлоридного пластика) принимают меньшие значения λ , для низковязких (ПЭНП, полиамиды) — большие. (Приведенные степени вытяжки являются «условными», как было сказано в главе 4; для нахождения «истинной» степени вытяжки необходимо указанную величину умножить на коэффициент разбухания по площади поперечного сечения λ_s , соответствующий средней скорости экструзии в фильере).

В [23] показано, что величина показателя степени n_b в выражениях (6.2), (6.3) не зависит ни от размеров формующего канала, ни от режима экструзии профиля, следовательно, является материальной константой, связанной с проявлением расплавом эластических свойств и характеризующей интенсивность изменения ширины экструдата при вытяжке.

Эту величину можно характеризовать как коэффициент Пуассона для анизотропных расплавов в переходной неизотермической области. Более правильно ее называть коэффициентом поперечной деформации (глава 4).

В табл. 6.7 приведены значения v_b для некоторых термопластов.

6.3.2.2. Обеспечение равноскоростной экструзии по ширине щели фильеры

После определения размеров формующей щели необходимо обеспечить равномерный выход расплава по сечению канала фильеры. Это достигается путем изменения формы и размеров подводящих каналов. Каждая частица расплава движется от некоторого условного сечения, принятого за базовое, до выхода из головки по своей линии тока, причем это движение неравномерное: то ускоренное, то замедленное, то круговое (в застойных зонах). Из-за высокой вязкости течение обычно имеет ламинарный характер, и в правильно сконструированной головке линии тока не должны пересекаться.

Таблица 6.7. Значения v_b в формулах (6.2), (6.3) для различных материалов

Материал	v_b
ПЭНП 17602-006	0,45
ПЭНП 17702-010	0,45
ПЭНП 15802-020	0,43
ПЭВП 20306-005	0,43
ПЭВП 20706-016	0,40
ПЭВП 20806-024	0,46
ПП 204-05-901	0,44
Наполненный ударопрочный полистирол АТ	0,40
УП УПМ-0508	0,48
ПВХ пластифицированный, рецептура 230	0,43
ПВХ пластифицированный, рецептура 1183	0,45
ПВХ пластифицированный, рецептура К-21-Н	0,445
ПВХ пластизоль Д2А «ОС»	0,47
АБС 2020С	0,41
АБС Люстран HR 850	0,445
Полиамид П-12Э	0,45

Однако выполнить это требование не всегда возможно, поскольку при установке головок на одношнековом экструдере расплав сходит со шнека в виде спирали, которая постепенно преобразуется в сплошной поток. Но эта неравномерность входа остается, если не предусмотреть мер для компенсации вращательного движения расплава. Это достигается сужением с последующим расширением канала на входе в головку, установкой на входе решеток с пакетом сеток, изменением величины кольцевого зазора между коническим наконечником шнека и конической формой входа в адаптер.

Положение отверстия на фасаде фильеры следует выбирать таким образом, чтобы при прочих равных условиях неравномерность истечения была минимальной. Обычно рекомендуют совмещать ось экструзии с центром тяжести профильного отверстия, однако это правило работает не всегда.

В обработке металлов давлением (например, при прессовании металлов) под конструированием матриц понимается определение оптимального расположения каналов на зеркале плоской прессовой матрицы, величин рабочих поясков и углов торможения, а также исполнительных размеров канала (очка) [34–36]. Оптимальным считается такое положение канала, при котором разброс скоростей истечения отдельных элементов профиля минимален. В основу методики расчета положена математическая модель процесса прессования. Сущность методики расчета матрицы для прессования основывается на предположении, что сечение профиля сложной конфигурации можно разделить весьма тонкими перемычками на сравнительно простые

элементы. При этом рассматривается задача многоканального прессования, где каналами служат простые элементы, в целях подготовки исходных данных для расчета по всей совокупности профилей.

Разбиение профиля на элементы производится с учетом следующих рекомендаций:

- сечение профиля разделяется на части по местам резкого изменения толщины стенки;
- каждая из частей делится на элементы так, чтобы площади элементов каждой части были по возможности одинаковыми; желательно, чтобы конфигурация элемента была простая (прямоугольник, круг);
- при аппроксимации элемента прямоугольником, по возможности, выполнять следующие условия:
 - площадь прямоугольника должна быть равна площади элемента;
 - центр тяжести прямоугольника должен совпадать с центром тяжести элемента;
 - при разбиении профиля на прямоугольные элементы целесообразно сохранять общий контур профиля.

При формировании профилей из расплава полимера также можно придерживаться этих рекомендаций. Задача осложняется специфическими особенностями течения и деформирования вязкоупругих жидкостей, поэтому достижение равномерного выхода расплава из головок сложного сечения — самый трудный, ответственный и наименее изученный этап конструирования экструзионных головок, несмотря на огромное количество теоретических и экспериментальных исследований по течению полимеров в каналах различной геометрии.

Основная задача при конструировании экструзионной головки со сбалансированным (равномерным) истечением расплава состоит в профилировании подводящих каналов, форма и размеры которых позволяют получить экструдат (заготовку) с минимально возможными искажениями. В отличие от прессования пластичных сред, которые при выдавливании практически сохраняют форму канала, при выходе вязкоупругой жидкости искажение формы и размеров по сравнению со щелью фильеры может быть значительным, и тем больше, чем выше упругость расплава и скорость экструзии, меньше время пребывания в формирующем канале с постоянными размерами.

Как показано в главе 4, к таким искажениям относятся бочкообразность прямоугольных участков, заворачивание, скручивание экструдата в зависимости от соотношения скоростей выдавливания на отдельных участках, сдвиг слоев и разрывы для материалов с невысокой прочностью на сдвиг или на растяжение. Таким образом, для вязкоупругих жидкостей обнаруживаются те же проблемы, что и у вязких и пластичных сред, усугубляемые упругим последствием и неизотермичностью процесса формирования после выхода материала из головки.

Течение расплава в каналах переменного сечения — сложный процесс, который трудно поддается математической формализации в достаточно простой для практики форме, поэтому при расчетах прибегают к многочисленным упрощениям и допущениям.

6.3.2.3. Реологические требования к экструзионным головкам

С реологической точки зрения конструкция головки должна удовлетворять следующим требованиям:

- гидравлическое сопротивление головки не должно быть слишком высоким, поскольку это приводит к возникновению высоких давлений, ограничивающих производительность процесса;
- форма внутренних каналов головки и чистота их обработки должны обеспечивать высокие скорости течения без ухудшения качества экструдата (разрывы потока, эластическая турбулентность, огрубление поверхности);
- форма и размеры подводящих каналов и фильеры должны учитывать разбухание и вытяжку экструдата после выхода из головки;
- конструкция профилирующих органов головки должна быть достаточно жесткой, чтобы при рабочих давлениях, развиваемых в головке, сечение проточной части оставалось неизменным;
- в конструкции головки следует предусматривать возможность регулирования потоков расплава по ширине формирующего инструмента в целях компенсации влияния неточностей расчета и изготовления на форму и размеры экструдата.

Экструзионная головка обычно состоит из ряда последовательных сопрягаемых каналов различной формы, часто весьма сложной, представляя собой многосвязный канал переменной геометрии. Поскольку расплав представляет собой вязкую жидкость, его течение подчиняется законам гидравлики. Сложность расчетов течения расплавов полимеров состоит в том, что реологические характеристики потока (вязкость, упругость) зависят от параметров процесса течения.

Расчет должен производиться для предельных режимов течения, например, для максимально возможной производительности экструдера и максимально возможного давления в головке. Последнее требование необходимо для обеспечения плотности стыков сопрягаемых деталей, жесткости конструкции головки, а также качества экструдата. Максимальное давление соответствует закрытой головке, расход через которую равен нулю; его значение определяют при совместном рассмотрении уравнений производительности шнека и головки [37, 38].

Экструзионная головка не может пропустить больше материала, чем подает шнек, поэтому оптимальное геометрическое сопротивление головки определяется исходя из максимальной производительности экструдера. Фактическое давление в головке часто значительно ниже допустимого и зависит от реологических свойств перерабатываемого материала и конкретных условий экструзии.

При так называемом «гидравлическом расчете» определяют общий перепад давления по длине головки при заданной производительности процесса. Точные аналитические методы расчета разработаны лишь для каналов простой геометрической формы: цилиндрической, кольцевой, прямоугольной [38]; в остальных случаях приходится использовать приближенные методы, точность которых для практических целей вполне удовлетворительна.

В главе 4 приведены формулы для расчета перепадов давления по длине каналов различной геометрической формы. Для расчета каналов с криволинейной формой образующих используют ступенчатую аппроксимацию, заменяя каналы перемен-

го сечения или сложной формы короткими ступенями с постоянными размерами и приближенной формой, равновеликой имеющейся [39–41]. В общем случае при расчетах головок для преодоления математических проблем приходится вводить ряд допущений и ограничений, снижающих точность расчетов и требующих последующей корректировки каналов или параметров технологического процесса экструзии, а именно:

1. *Расплав смачивает стенки канала и скольжение на стенках отсутствует.* Для большинства расплавов полимеров это допущение справедливо. Для некоторых высоковязких расплавов возможно проскальзывание расплава на стенке (например, для некоторых композиций НПВХ, переработка которого ведется в «стержневом» режиме течения; для некоторых марок ПЭВП с узким ММР).

2. *Течение расплава происходит при изотермических условиях.* Это допущение в известной мере условно, поскольку температура при экструзии несколько изменяется как по поперечному сечению, так и по длине канала, однако поскольку при расчетах оперируют средней температурой расплава в данной зоне головки, то допущение можно считать приемлемым.

3. *Течение расплава — установившийся процесс.* Здесь надо различать стационарность процесса во времени и в пространстве. Во времени процесс можно считать стационарным, поскольку в любой момент времени через данное сечение канала головки проходит одно и то же количество расплава с заданными характеристиками, определяемыми параметрами процесса (частотой вращения шнека, температурой расплава, сопротивлением головки). Вместе с тем по длине головки расплав изменяет свое состояние в результате различного воздействия. Конечное состояние, которое расплав имеет на выходе из головки, зависит от предыстории его деформирования на всем пути от входа в головку до выхода. Подготовка расплава в каналах шнека также оказывает влияние на поведение расплава в головке и после нее.

Допущение о стационарности пространственного течения может быть принято для относительно «длинных» формующих каналов, когда реологические характеристики расплава уже не зависят от времени деформирования расплава, а только от скорости и температуры, при которых осуществляется течение, поэтому экструзионные головки обязательно имеют формующую зону с постоянными размерами, в которой происходит релаксация расплава от термомеханических воздействий в каналах головки перед формующей зоной. Такие воздействия на расплав в отдельных каналах головки могут быть достаточно интенсивными и целенаправленными. Например, для устранения линий спаев после прохождения спиц дорнодержателя в головках для производства труб из полиолефинов за дорнодержателем устанавливают сужающееся кольцо, а также специальные перфорированные решетки с мелкими отверстиями; спицы дорнодержателя размещают под углом к направлению течения и т. д. Технические решения интенсивного воздействия на расплав много, и их применение диктуется специфическими требованиями для каждого конкретного случая.

В коротких каналах с постоянными размерами при высокой скорости течения релаксационные процессы не успевают завершиться и продолжаются на выходе из головки, что приводит к искажению формы экструдата вследствие разбухания. От степени завершенности релаксационных процессов зависит последующее поведение расплава на выходе из головки.

В каналах переменного поперечного сечения скорость деформации непрерывно изменяется, изменяются вязкостные и релаксационные характеристики материала, а значит процесс в смысле постоянства реологических свойств материала следует считать нестационарным.

Реологические свойства полимера определяют на приборах в стандартных идеализированных условиях (строго постоянная температура, учет входных поправок на нестационарность течения, учет разогрева полимера и его влияние на изменение реологических характеристик). Если эти идеализированные данные без поправок перенести на реальные условия переработки, то могут возникать ошибки.

4. *Расплав несжимаем.* При экструзии изменение плотности расплава при изменении давления (до 250–300 атм) не превышает 3%, что позволяет пренебречь этим влиянием.

5. *Упругие эффекты при течении расплавов отсутствуют.* Это означает, что вся энергия воздействия на расплав при сдвиговых деформациях и деформациях растяжения–сжатия превращается в тепло. Для подавляющего большинства полимеров это допущение очень условно, поскольку упругие эффекты при течении имеются и проявляются в виде разбухания экструдата и накопления остаточных напряжений. При этом характер разбухания и его уровень зависят от особенностей течения расплава конкретного полимера, формы и размеров каналов. При течении, например, через каналы прямоугольного сечения наблюдается неоднородность разбухания в различных точках поперечного сечения экструдата: в середине экструдат толще, чем по краям, поэтому он приобретает бочкообразную форму; в еще большей степени проявляются искажения экструдата при течении расплавов через каналы сложного поперечного сечения. Эти явления следует принимать во внимание при конструировании формующего инструмента, особенно при переработке материалов с высокой упругостью расплава (полиэтилен, полистирол, пластифицированный ПВХ).

Поскольку вблизи стенок канала скорости ниже, чем в центре потока, то необходимо облегчить течение у стенок канала, что достигается либо увеличением высоты канала в подводящей части, либо изменением формы отверстия фильеры на выходе таким образом, чтобы компенсировать неоднородность разбухания экструдата (рис. 6.10).

Допущение об отсутствии при течении упругих эффектов некорректно, так как оно предполагает, что размеры формующего канала должны соответствовать форме и размерам экструдированного профиля. Но как уже было показано выше, ни форма, ни размеры канала не соответствуют профилю, и только для чисто пластических материалов это допущение можно принять. Приведенный выше расчет размеров каналов с учетом разбухания и вытяжки является в некоторой степени учетом упругих эффектов в практическом приложении.

При конструировании подводящих каналов головок для первоначальных расчетов могут быть использованы уравнения течения ньютоновской или неньютоновской жидкости через каналы различного поперечного сечения. Выбор вида уравнения зависит от конкретных целей расчета, наличия сведений о реологических свойствах материала, а также границ применения выбранного уравнения течения.

В простейшем случае перепад давления в канале заданной геометрии можно определить на основе формул гидравлики для вязких жидкостей:

$$\Delta P = WQ\eta, \quad (6.7)$$

где W — сопротивление канала (геометрический фактор), см^{-3} ($W = 1/K$, K — коэффициент геометрической формы канала); η — эффективная вязкость (реологический фактор), $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{см}^2$; Q — объемный расход, $\text{см}^3/\text{сек}$.

Хотя выражение (6.7) в явном виде не учитывает неньютоновский характер течения, его влияние проявляется через зависимость эффективной вязкости η от скорости сдвига и температуры, в которую входит также показатель степени n , характеризующий степень отклонения от ньютоновского течения.

Для каналов некруглой формы следует использовать формулы, учитывающие фактор формы, а именно соотношение ширины B и высоты H (или максимального и минимального размеров) участка профиля:

$$K_f = \frac{BH^3}{12L} f = \frac{FH^2}{12L} f, \quad (6.8)$$

где F — площадь поперечного сечения канала; f — коэффициент формы канала, определяемый по номограммам в зависимости от типа канала и соотношения поперечных размеров [13, 42].

Вязкость расплава η определяют по кривым течения материала $\eta = \eta(T, \gamma)$. Сведения по реологическим свойствам некоторых отечественных термопластов могут быть найдены в [43], по зарубежным маркам материалов — в [44, 45].

В [42] при расчете профильных фильер со сбалансированным течением для сравнения используются реологическое уравнение Прандтля–Эйринга и степенной закон течения.

Уравнение Прандтля–Эйринга имеет вид:

$$\dot{\gamma} = C \operatorname{sh}(\tau/A),$$

где γ , τ — скорость и напряжение сдвига; C и A — параметры, зависящие от реологических характеристик материала.

При малых скоростях течения известное степенное уравнение течения справедливо лишь в центральной области потока, тогда как вблизи стенок скорости сдвига резко возрастают. Этой некорректностью авторы объясняют выбор уравнения Прандтля–Эйринга, поскольку оно действительно и при $\tau \rightarrow 0$.

В работе анализируется течение в двух смежных каналах разной формы. Для исследования выбраны каналы круглой, кольцевой, прямоугольной, треугольной, шестиугольной и Н-образной формы. Смежные каналы различной формы и размеров не разделяются продольной перемычкой, поэтому возможность поперечного перетекания расплава из области высокого давления в канал с малым давлением допускается.

Задача сводится к расчету формирующих длин участков, при которых средние скорости течения на выходе из них одинаковы; влияние подводящих каналов до фильеры на перепад давления не учитывается.

На взгляд автора, исключение из рассмотрения влияния подводящих каналов вносит большие погрешности, чем некорректность в учете формы канала. К тому же при экструзии профильных изделий область скоростей сдвига меньше 1 с^{-1} встречается крайне редко, поэтому применение достаточно сложного для расчетов уравнения Прандтля–Эйринга вряд ли оправдано.

Падение давления в фильере происходит на любых участках по ее длине; чтобы оценить возможность его пренебречь, важно знать величину этого падения.

Каждая профильная фильера состоит из ряда параллельных и последовательных каналов. Для сбалансированного течения суммарные перепады давления в параллельных каналах должны быть одинаковы. Используя выражение (6.7) для фильеры в целом, можно подобрать размеры подводящих каналов таким образом, чтобы выровнять падения давления в фильере с заданными размерами формирующих каналов. Для такого случая можно записать равенство:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,j} = \text{const}, \quad (6.9)$$

где индекс i относится к параллельному каналу, j — к последовательному; N — количество последовательных каналов.

Запишем выражение (6.9) в форме (6.7) для фильеры, состоящей (как в работе [42]) из круглого и прямоугольного смежных каналов, но смежные каналы отделим тонкой перемычкой, исключив поперечное перетекание расплава по всей длине фильеры. Как показывает практика, без этого добиться равномерного течения бывает очень сложно, особенно если каналы значительно различаются по размерам поперечного сечения (по высоте зазора, диаметру и т. д.).

Длину круглого канала примем равной длине фильеры, а прямоугольный канал состоит из двух последовательных каналов. Вход в фильеру примем прямоугольным с высотой, равной диаметру круглого канала, а ширина прямоугольника на входе равна сумме ширины и диаметра прямоугольного и круглого формирующих каналов. Схема фильеры приведена на рис. 6.13. Влиянием резких переходов по длине прямоугольного канала и на входе в фильеру для простоты иллюстрации расчета пренебрегаем.

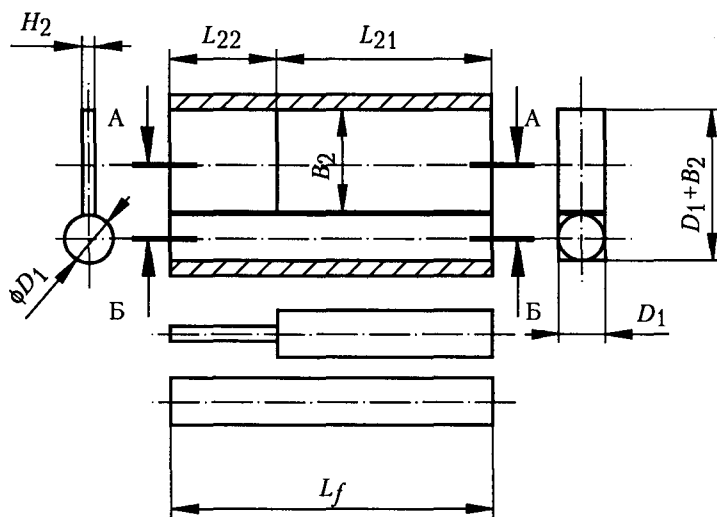


Рис. 6.13. Фильера с участками разной толщины

При общей длине фильеры $L_f = 100$ мм длина участка входа для второго канала — L_{21} ; высота входа в фильеру — D_1 ; диаметр первого канала $D_1 = 5$ мм; высота второго канала на выходе $H_{22} = 1$ мм; общая ширина входа в фильеру $B_f = D_1 + B_2 = 20$ мм. Ширина прямоугольного канала на выходе $B_{22} = 16$ мм.

Для расчета подобных фильер в электронных таблицах *Microsoft Excel* разработана программа, расчет по которой показывает, что для жесткого ПВХ общий перепад давления по длине фильеры длиной 100 мм при $T = 170$ °С составляет около 400 атм. При этом равенство средних скоростей достигается при длине прямоугольного формующего канала 58,5 мм. Следует отметить, что точность расчета перепада давления по сравнению с фактическим зависит не только от корректности используемых формул и введенных допущений, но и корректности реологических характеристик расплава.

Приведенный пример иллюстрирует принцип расчета; конкретные формулы расчета каналов следует вводить в соответствующие ячейки электронной таблицы в зависимости от формы и размеров канала. Реологические характеристики, необходимые для расчета вязкости, берутся из справочных материалов или для конкретной марки по кривым течения.

При расчете фильеры другой формы и размеров, состоящей из нескольких параллельных участков, сначала следует составить расчетную схему участков, нанести необходимые размеры и указать в таблице постоянные значения, для которых производится расчет: массовый расход, температуру расплава, плотность расплава при температуре экструзии, реологические характеристики материала. После завершения подготовительной работы путем подбора размеров подводящих каналов в пределах, определяемых конструкцией головки, находят оптимальный вариант, при котором перепады давления по длине параллельных каналов отличаются от величины для базового канала на приемлемую для практики величину. В нашем случае отклонение составило менее 1%, хотя на практике обычно достаточно точности в пределах 5%.

Использованная программа расчета при помощи электронной таблицы не обладает общностью для фильер различной формы и размеров, и хотя возможность ее разработки существует, но она получится громоздкой, поскольку должна учитывать многообразие форм каналов и повторяемость ряда форм в произвольной фильере. Кроме того, в реальных фильерах переходы могут быть достаточно сложными, и придется прибегать для упрощения и повышения точности расчетов к ступенчатой аппроксимации.

Преимущество расчетов при помощи электронных таблиц состоит в их наглядности и практически мгновенном получении результата при изменении каких-либо численных значений параметров. Для первичных расчетов составить программу расчета любой фильеры по аналогии с приведенным примером относительно несложно в течение нескольких часов. Практика показала, что даже такие очень приблизительные расчеты весьма полезны для сокращения доводочных работ по оснастке.

В реальных фильерах форма подводящих каналов более сложная. За начальное сечение при расчете принимают такое сечение, в котором профиль скоростей течения близок к плоскому. Выбор начального сечения условен и зависит от опыта конструктора и конструкции головки; во многих случаях при изготовлении небольших сплошных профилей используют сферическую или коническую форму входа в канал (рис. 6.5). Хотя сферический вход не свободен от застойных зон, он аккумулирует

материал на входе для выравнивания профиля скоростей в гораздо большей степени, чем конический. Круговой конус, напротив, направляет поток в центральную область фильеры, где скорости и так выше, что приводит к еще большей неравномерности течения по ширине щели, если не принято дополнительных мер против этого. В каждом конкретном случае эта задача решается индивидуально. Затрудненные зоны течения при сферическом входе легко убираются с помощью локальных фасок, скруглений канала на входе и местными углублениями. Кроме того, общие программы объемного компьютерного моделирования (*Mechanical Desktop, Inventor, Solid Works, Компас 3D* и др.) позволяют посмотреть в объеме линии переходов каналов и устранить застойные зоны еще на стадии проектирования.

При изготовлении полых профилей в качестве сечения, где профиль скоростей близок к плоскому, можно принять сечение на выходе из дорнодержателя. Эти рекомендации условны и зависят от конкретной конструкции головки, но при конструировании новой головки можно принять эту рекомендацию в качестве отправной.

Современные компьютерные технологии позволили создать прикладные моделирующие программы для определения распределения скоростей, давлений и температур по узлам сетки, используемой в методе конечных элементов (МКЭ). Эти программы в большинстве случаев базируются на анализе четырех фундаментальных уравнений: неразрывности, движения, теплового баланса и реологического уравнения. Разбиение пространства каналов на конечные элементы и нумерация узлов производится автоматически [6, 46–57].

Особенностью всех моделирующих программ является необходимость задания формы каналов головки в математической форме, а программа выдает результаты расчета скоростей течения, давлений, температуры по узлам сетки. Количество узлов может достигать десятков и сотен тысяч, поэтому приходится решать систему уравнений, состоящих из такого же количества линейных уравнений. Таким образом, с помощью моделирующей программы приходится выполнять поверочный расчет головки. Это предполагает использование программ высококвалифицированными специалистами, разбирающимися в тонкостях процессов течения вязких жидкостей и понимающих, к чему может привести каждое действие по корректировке формы канала.

При неудовлетворительной оценке распределения скоростей, давлений или температур производится корректировка формы каналов, и расчет повторяют. Подобный расчет может повторяться многократно. Затрачиваемое на него время может значительно зависеть от опыта конструктора, количества расчетных узлов сетки и мощности вычислительной системы. Основное время затрачивается не на сам расчет, а на подготовку расчетной схемы и данных для выполнения расчета.

Наибольший интерес для расчета и проектирования экструзионных головок для изготовления профильных изделий представляют программы *PolyFlow* (Бельгия, фирма *Poly-Flow*), программы *PROWEX, MOTEX, HEIZEN* Института по переработке пластмасс (*IKV*), Германия и др. Такие программы дороги и пока труднодоступны; их применение оправдано в случаях, когда затраты на освоение продукции превышают стоимость самой программы и затраты на обучение персонала и выполнение моделирующих расчетов, поэтому актуальна разработка упрощенных программ расчета, которые можно было бы использовать для практических расчетов на обычных персональных компьютерах.

граммами и наработки библиотеки элементов и модулей головок конкретного назначения время разработки может превышать даже ручное проектирование [58].

6.3.3. Размеры формующего инструмента при экструзии с калиброванием

Поскольку большинство профильных изделий получают путем калибрования «заготовки», определяемой формой и размерами фильеры, необходимо установить влияние калибратора на размеры формующей щели. По-видимому, калибрование накладывает определенные ограничения на деформирование экструдата, которые следует учитывать при определении размеров формующего инструмента. Путем изменения положения калибратора относительно головки происходит фиксирование форм экструдата на разных стадиях его вытяжки и охлаждения.

При изготовлении сплошных открытых профилей (тип 4) могут применяться различные схемы пластического деформирования экструдата в калибраторах, отличающиеся степенью заполнения расплавом щели канала. Чаще используется схема деформирования со свободным уширением, характеризующаяся некоторым увеличением ширины деформируемого участка при его обжатии по толщине стенки. Если ширина канала значительно больше, чем возможное уширение участка при обжатии, то говорят о свободном уширении, хотя увеличение ширины зависит от сил трения между экструдатом и стенками канала калибратора.

При калибровании с ограниченным уширением боковые стенки до некоторой степени препятствуют увеличению ширины экструдата при обжатии, в результате чего при полном заполнении канала калибратора расплавом не происходит и профиль приобретает скругленные углы.

При калибровании по контуру расплав полностью заполняет рабочую полость калибра, в результате чего возникают значительные силы трения как в самом калибраторе, так и на входе в него. Эта схема калибрования встречается сравнительно редко и только при экструзии профилей простой геометрической формы. Калибрование проводится при высоком обжатии экструдата и при наличии водяной смазки, подаваемой через вакуумные отверстия в канале, особенно для материалов, склонных к липкости к поверхности калибратора.

В [26] было установлено, что при калибровании экструдата по первым двум схемам размеры формующего инструмента могут быть приблизительно подсчитаны по тем же формулам, что и при экструзии без калибрования, если положение калибратора относительно экструзионной головки не очень сильно искажает продольный профиль экструдата по сравнению со свободной вытяжкой. Поскольку размеры формующего отверстия превышают размеры канала калибратора не более чем на 5–10%, искажение продольного профиля экструдата невелико при расположении входа в

ная вытяжка λ равна произведению λ_1 и λ_2 . Чтобы в канале с постоянными размерами при таком способе калибрования не было дальнейшей вытяжки экструдата, необходимо создать корректные условия деформирования расплава на входе. Фактически здесь имеет место волочение некруглого профиля через обжимную зону калибратора, за пределами которой деформация не допускается.

Основным отличием волочения некруглых сплошных профилей от волочения круглых при прочих одинаковых условиях процесса (величины продольной вытяжки, длины зоны обжатия, условия трения и др.) является отсутствие осесимметричности деформаций, увеличение их неравномерности, дополнительных сдвигов в разных направлениях контактной поверхности, более сложный характер изменения коэффициентов трения.

Мерой сложности формы поперечного сечения профиля может служить отношение периметра контура профиля к периметру равновеликого круга, а также отношение расстояний между двумя наиболее удаленными точками каждого контура при одинаковых поперечных сечениях [59].

Несмотря на кажущуюся простоту процесса волочения и существование этого процесса почти в неизменном виде более 100 лет, многие его элементы изучены далеко не полно. Это связано со сложностью протекающих процессов и влиянием многочисленных факторов: прочностные и пластические свойства материала, степень и скорость деформации, форма зоны обжатия, качество обработки материала инструмента (в данном случае волокна) и материала, подвергающегося деформированию, наличие смазки, тепловые процессы при трении и обжатии.

По-видимому, деформирование расплавов с теоретической точки зрения происходит не проще, чем пластичных металлов, уже в силу зависимости свойств пластмасс от условий деформирования, неизотермичности процесса и других действующих факторов.

Трубы и трубообразные профили обычно калибруют по наружному периметру с помощью сжатого воздуха или вакуума. При калибровании сжатым воздухом калибратор располагается вплотную к формирующему инструменту (через малый воздушный зазор 0,5–1 мм), вследствие чего разбухание заготовки по диаметру ограничивается втулкой калибрующего устройства. Такое ограничение приводит к перераспределению деформаций разбухания по диаметру и толщине стенки трубы, не изменяя сколько-нибудь значительно величину разбухания по площади поперечного сечения.

Между диаметрами мундштука и калибратора для пневмокалибрования в соответствии с практическим опытом устанавливается определенное соотношение: диаметр мундштука принимается для большинства термопластов несколько меньше диаметра калибрующей втулки, например, на толщину стенки трубы или величину формирующего зазора между мундштуком и дорном. Для этого случая в [24] приведен расчет размеров мундштука и формирующего зазора трубной экструзионной головки.

При вакуумном калибровании диаметр мундштука на 3–20% больше диаметра калибрующей втулки. Большая величина применяется для тонкостенных труб малого диаметра из материалов с высокой прочностью расплава (ПЭНП, ПЭВП, ПП, ударопрочного ПС, ПА). Зону входа в калибратор целесообразно выполнять без конического входа с округлением радиуса на входе, иначе возможно образование складок на поверхности трубы из-за ограничения пластической деформации вследствие ох-

лаждения экструдата. В остальном калибратор мало влияет на размеры формирующего инструмента, поскольку реализуется случай, аналогичный описанному выше для сплошных профилей.

6.3.3.1. Формование профилей из заготовок простого поперечного сечения

Некоторые типы сплошных и полых профилей с одинаковой толщиной стенок и со скругленными углами можно формовать из заготовок простого поперечного сечения: трубы, полосы, прутка. Формование производится с помощью пластического деформирования экструдированной заготовки в калибрующих устройствах различных типов, при этом размеры формирующего инструмента должны учитывать особенности деформирования заготовки после экструзионной головки.

Процесс формования изделия можно условно разделить на три последовательные деформационные стадии: разбухание расплава, вытяжка экструдата с заданной степенью вытяжки, изменение формы заготовки в калибраторе при неизменном периметре. Все эти стадии протекают одновременно, поэтому уже на участке вытяжки между головкой и калибратором форма заготовки изменяется почти до конечного состояния, в связи с чем протяженность участка вытяжки расплава должна быть больше, чем при калибровании заготовки подобной форме профиля. Для расчета размеров формирующего инструмента такое упрощение позволяет представить весь процесс как свободную вытяжку экструдата с последующим дереформованием при неизменном периметре.

Например, при формовании прямоугольной трубы из цилиндрической заготовки ее наружный периметр в конце зоны вытяжки имеет значение $P_\lambda = \pi D_{o\lambda}$, где $D_{o\lambda}$ — наружный диаметр трубообразного экструдата при степени вытяжки λ . После переформования в калибраторе периметр трубы станет равным наружному периметру прямоугольной трубы: $P_p = 2(B + H)$. При неизменности периметра на последней стадии имеем $P_\lambda = P_p$ или:

$$D_{o\lambda} = 2(B + H)/\pi.$$

Диаметр экструдата при свободной вытяжке со степенью вытяжки λ находим из выражения (6.3):

$$D_{o\lambda} = \frac{(D_f - H_f)}{\lambda} \frac{H_f}{H} + H.$$

Приравнявая выражения и решая уравнение относительно наружного диаметра мундштука, получим:

$$D_f = \left[\frac{2(B + H)}{\lambda} - H \right] \lambda \frac{H}{H_f} + H_f, \quad (6.10)$$

где H_f определяется из первого выражения (6.3) или на основе практических рекомендаций (для НПВХ H_f принимается равным толщине стенки профиля).

Калибрование изделий по этому методу формования (*postforming*) производят либо с помощью вакуумных устройств, либо путем протяжки через длинномерный калибр, либо путем прокатки в фигурных роликах. Между формирующим инструментом и калибрующим устройством должно быть определенное расстояние, в пределах которого происходит постепенное изменение формы и размеров заготовки. Изменение расстояния между головкой и калибром при неизменных скорости экструзии и отвода изделия влияет на величину средней скорости продольной деформации и процесс деформирования заготовки и, в конечном итоге, на свойства изделия. Поэтому для конкретного изделия необходимо подбирать оптимальное расстояние между головкой и калибром.

Аналогично следует поступать и при расчете размеров формирующего инструмента для других изделий, используя формулы для участков круглого, прямоугольного или кольцевого сечений, которые приведены выше.

6.4. Доводка оснастки

Доводка формирующего инструмента является обычной практикой при разработке нового технологического процесса, поскольку получить с первого раза изделие требуемой формы и размеров, как правило, не удается. При первых испытаниях оснастки обнаруживаются неудачные или ошибочные решения, связанные с конструкцией оснастки, несоответствием изготовленной детали чертежу и т. д. Исправление этих недостатков требует машинной или ручной обработки деталей. Ручная обработка применяется для незначительной корректировки каналов и допускается только в зонах входа в фильеру.

Ручная обработка производится либо с помощью механизированного инструмента (электрифицированные бормашинки малой мощности с набором твердосплавных, корундовых или алмазных боров; инструмент с гибким валом, пневматические бормашинки, ультразвуковой инструмент), либо вручную с помощью слесарного инструмента (набора надфилей, полировальных шкурок и паст) [60]. Основные приемы работы связаны с удалением металла с детали с последующей зачисткой и полировкой поверхностей, особенно тех, которые соприкасаются с расплавом вблизи выхода из головки, хотя в некоторых случаях приходится наращивать металл на поверхности (это нежелательно, но другого способа, кроме изготовления новой детали, нет).

Существуют различные способы наращивания слоя металла, которые имеют свои преимущества и недостатки. Это лазерная и импульсная сварка, гальваническое осаждение металла и пр.

В 90-х гг. прошлого века был разработан процесс холодной импульсной сварки, который имеет широкое применение за рубежом. В основу метода положен разряд конденсатора большой емкости на электрод, которым к ремонтируемой поверхности прижимается присадочный материал [60]. Сварка происходит за счет диффузии материала присадки в поверхность ремонтируемой детали. Последовательность импульсов и перемещение электрода по поверхности обеспечивает неразрывность, но не герметичность сварного шва. Аппараты импульсной сварки позволяют наваривать тонкие пластинки металла, наращивая слой необходимой толщины, состоящий из

3–5 пластинок. На кромки детали может навариваться металлический порошок, обеспечивающий восстановление «забитых» мест. Процесс протекает без существенного разогрева и, соответственно, без изменения механических характеристик основной детали. Данная технология имеет небольшую производительность, она позволяет осуществлять восстановление поврежденных поверхностей разъемов, изменение радиусов скруглений внутренних углов, заделку дефектов после аргонно-дуговой сварки, заделку вмятин и царапин от ударов, восстановление тонких выступающих элементов, изменение размеров небольших элементов формообразующих поверхностей, восстановление острых кромок, заделку царапин и прижегов.

К настоящему времени разработано и поставляется на рынок несколько типов сварочных аппаратов с одинаковым уровнем цен, но с разными характеристиками и возможностями. Наиболее подходящим для проведения указанных выше работ является аппарат *PW 1-2000* австрийской фирмы *Protec*. Аппарат снабжен микропроцессорным управлением, защитой от перегрева, имеет повышенную производительность; в комплекте поставляются соединительные кабели, ножная педаль-выключатель, электроды, образцы присадочных материалов. Аппарат потребляет мощность не более 1000 вольт-ампер переменного тока напряжением 220 В; сварочный ток — до 2000 А; толщина присадочной пластины до 0,4 мм, проволоки — до 0,8 мм. Масса аппарата 22 кг, стоимость — около 11 000 Евро.

Поскольку цена непоправимой ошибки при доводке сложных и металлоемких деталей может составлять сотни или даже тысячи долларов, то выполнять доводочные операции должны квалифицированные специалисты при помощи необходимого инструментария, понимающие назначение деталей и смысл выполняемых операций. Только в этом случае возможна быстрая доводка деталей с минимальными финансовыми затратами.

Поскольку доводка неизбежна, то первоначальная твердость термообработки деталей должна быть не выше 30–32 HRC и в самой конструкции головок целесообразно предусматривать места для регулирования потоков. При этом надо учитывать следующее:

- а) изменение потоков путем подпиливания детали по высоте канала наиболее эффективно, так как сопротивление течению обратно пропорционально третьей степени высоты канала и пропорционально только первой степени длины;
- б) изменением скорости отвода изделия можно в широких пределах регулировать величину степени вытяжки расплава и изменять размеры изделия, однако только с помощью вытяжки достичь нужных размеров профиля невозможно, поскольку размеры в разных направлениях при вытяжке меняются неодинаково;
- в) при конструировании формующих деталей целесообразно ставить минусовые допуски на высоту формующих зазоров с учетом последующей доработки; при возникновении сомнений с установкой размеров формующих каналов целесообразно их задавать так, чтобы в случае ошибки приходилось удалять металл, а не наращивать;
- г) при наличии разделительной перегородки между участками фильеры необходимо предусматривать возможность укорачивания ее со стороны выхода в процессе доводки головки; это особенно важно при экструзии материала с высо-

кой вязкостью расплава, требующего более длительного контакта свариваемых потоков;

- д) в рабочих чертежах на детали головки целесообразно указывать места возможной корректировки при доводке;
- е) конструкция деталей должна предусматривать доступность мест для возможной обработки; при изготовлении неразъемных деталей корректировку каналов производят со стороны входа, изменяя длину и угол наклона фасок; возможно также углубление локальных входов в формующую часть с помощью абразивных камней или твердосплавного инструмента.

Процесс доводки формующей головки проводится обычно в две стадии. На первой стадии проверяется равномерность выхода расплава по сечению, принимая экструдат без внешней вытяжки. При разных скоростях выхода расплава изменяют высоту или длину участков, на которых происходит задержка расплава. Эти операции повторяют до приемлемого выравнивания скоростей, после чего приступают ко второй стадии.

На второй стадии корректировку проводят по изготавливаемому изделию в реальном технологическом процессе. Замеряя контролируемые размеры, устанавливая отклонения от заданных значений и устраняют несоответствия изменением соответствующих исполнительных размеров фильеры или сопрягаемых с ней деталей. Эта стадия может быть продолжительной, так как конечная форма и размеры профиля зависят не только от конструкции формующего инструмента, но и от технологических параметров процесса: температуры расплава, расстояния между головкой и калибратором, величины вакуума по зонам калибратора, интенсивности охлаждения калибрующего устройства, возможности регулирования положения калибратора относительно щели фильеры по ширине и высоте, возможности предварительного охлаждения экструдата при входе в калибратор.

Возможны случаи, когда доводкой не удастся откорректировать форму или размеры изделия, в связи с чем приходится изготавливать новые детали. В некоторых случаях это может оказаться более дешевым и быстрым способом достижения положительного результата, чем сложный ремонт детали.

5.5. Литература

1. Limbach W. Extrudieren von Profilen. Werkzeuge und Profilen. Reifenhauser KG, Sonderdruck aus «B 4007-Extrudieren von Profilen und Rohren». Werkzeuge und Folgeaggregate. / W. Limbach. — Duesseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1978. — 30 S.
2. РТМ по расчету и конструированию технологической оснастки для экструзии профильных изделий из термопластов: ротапринт / НПО «Пластик». — М., 1983. — 382 с.
3. Hensen F. Hahdbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik, Bd. 2 Extrusionanlagen / F. Hensen, W. Knappe, H. Potente. — Muenchen, Wien: Carl Hansen Verlag, 1986. — 708 S.
4. Крюгер Э. Разработка и изготовление пластмассового окна: Доклад на симп. на выставке «Интерпластика-90», Москва, 17–23 окт., 1990 / Friedrich Theysonh, ФРГ. — М., 1990.
5. Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch. Bd. 2 Extrusion / BASF. — 1971. — 268 S.
6. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations / W. Michaeli. — Second Edition. — Hanser Gardner Publications, 1992. — 340 p.

ГЛАВА 7. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

7.1. Поливинилхлорид и композиции на его основе

Поливинилхлорид (ПВХ) — один из наиболее давно известных полимеров, превосходящий все другие по разнообразию возможностей переработки и применения. К преимуществам ПВХ относятся широкие возможности модификации полимера разнообразными добавками. В чистом виде ПВХ не используется, так как это крайне термостабильный хрупкий материал, который под действием высоких температур начинает интенсивно деполимеризоваться с выделением хлористого водорода, хлористого винила, окиси углерода и других соединений. Когда говорят о ПВХ, имеют в виду композицию, состоящую из полимера и разнообразных добавок, делающих полимер способным к удовлетворительной переработке.

В композиции жесткого ПВХ вводят стабилизаторы для повышения способности материала к переработке при повышенных температурах и эксплуатации при воздействии внешних атмосферных факторов, смазки и модификаторы текучести для снижения прилипаемости (адгезии) расплава к рабочим органам перерабатывающих машин и технологической оснастки, модификаторы ударопрочности для увеличения стойкости к различным нагрузкам при эксплуатации, наполнители для повышения вязкости и формоустойчивости расплавов, а также для уменьшения стоимости композиции, другие добавки, повышающие стойкость к воздействию внешних факторов атмосферостойкость, морозостойкость и т. д.).

В мягкие композиции помимо указанных добавок вводят пластификаторы, благодаря которым изделия приобретают эластичность, гибкость, способность к работе при отрицательных температурах. С увеличением содержания пластификатора в композиции изделие становится более гибким.

Свойства ПВХ обусловлены, с одной стороны, его химическим составом, структурой и способом полимеризации, с другой стороны — влиянием соответствующих до-

бавок, которые должны способствовать сохранению или улучшению технических или эксплуатационных характеристик чистого полимера.

В зависимости от способа полимеризации различают суспензионный, эмульсионный и массовый ПВХ; для производства профильных изделий чаще всего используют суспензионный ПВХ.

Средняя степень полимеризации молекул полимера, средняя молекулярная масса ПВХ характеризуется константой Фикентчера K , величина которой связана с вязкостью полимера. С ростом K увеличивается вязкость расплава, теплостойкость, механические свойства, но ухудшаются технологические свойства.

7.1.1. Свойства частиц полимера

Композиции ПВХ перерабатывают в порошкообразном или гранулированном виде. Качество композиции и способность ее к переработке во многом зависят от свойств частиц полимера.

Свойства частиц зависят, в свою очередь, от способа полимеризации. Частицы должны быть малого размера, но не круглой шарообразной и стеклообразной формы, которая препятствует поглощению добавок. Очень крупные и очень мелкие частицы в общей массе полимера должны составлять незначительную долю [1]. Приведены основные марки и их характеристики отечественного суспензионного ПВХ, выпускаемого по ГОСТу 14332-78 [2].

Таблица 7.1. Марки и свойства суспензионного ПВХ по ГОСТ

Марка ПВХ	Назначение	K	Насыпная плотность, г/см ³	Остаток на сите 0063, %, не менее	Свойства
С-7058-У	Высокопрочные трубы	70–73	0,45–0,55	85	
С-6638-У	Жесткие изделия общего назначения, защитная техника	66–69	0,40–0,50	85	
С-6630-У		66–69	0,40–0,50	Не нормируется	Не
С-6388-Ж	Жесткие изделия (винипласт)	63–65	0,60–0,70	80	
С-6370-Ж		63–65	0,55–0,65	Не нормируется	Не
С-5868-ПЖ	Раздувные изделия для контакта с пищевыми продуктами	58–60	0,50–0,60	90	
С-5888-Ж	Экструзионные жесткие изделия	58–60	0,60–0,70	80	Не
С-5860-Ж		58–60	0,50–0,60	Не нормируется	

Порошкообразные композиции в виде сухих смесей типа «dry blend» должны иметь хорошую сыпучесть, не комковаться и слеживаться при хранении, иметь высокую насыпную массу. Последний показатель определяет производительность оборудования.

Частицы полимера должны иметь пористую структуру, что способствует лучшему поглощению жидких и порошкообразных добавок, вводимых в полимер на стадии приготовления композиции.

Современная техника полимеризации позволяет получать полимер с пористым строением частиц, но с большой насыпной массой. Насыпная масса может возрастать при приготовлении композиции в быстроходных смесителях, в которых в результате трения между частицами возрастает температура смеси.

На сыпучесть смеси оказывает влияние распределение частиц полимера по размеру: слишком высокое содержание мелких частиц может ухудшать сыпучесть, так как в результате электростатических сил могут образовываться комки и своды.

Если в смеси примерно в равных долях присутствуют частицы различной дисперсности (крупные, мелкие и средние фракции), то возникает опасность неравномерного распределения жидких добавок, особенно пластификаторов, и образование комков или густков твердых крупинок в готовой смеси. Максимальное содержание в смеси частиц одной фракции полимера способствует лучшей диспергируемости добавок.

Для переработки методом экструзии применяют преимущественно грубозернистый хорошо сыпучий полимер с размером частиц 63–160 мкм, содержание которых общей массе составляет до 80%.

Сыпучесть порошка полимера ПВХ можно определить двумя методами. По первому методу определяют время опорожнения воронки с определенным диаметром тверстия, в которую помещают навеску заданной массы. За показатель сыпучести принимают время опорожнения стандартной воронки с навеской 100 г полимера. По второму методу используют ряд воронок с различными отверстиями, в которые помещают навеску порошка. Сыпучесть определяют диаметром отверстия воронки, через которое порошок полностью проходит. Чаще пользуются первым методом.

При приготовлении смесей для получения мягких изделий большое значение имеет способность полимера к поглощению пластификаторов. Она также зависит от формы и пористости частиц и величины константы Фикентчера K , с ростом которой способность к поглощению пластификатора возрастает. Способность к поглощению пластификатора определяется различными лабораторными методами, например, с помощью диаграмм изменения крутящего момента на пластографе фирмы Брабенер (Германия), диаграмм поглощаемой мощности при приготовлении смеси на скоростных смесителях.

Порошок полимера и сухие смеси на основе ПВХ следует оберегать от попадания влаги. Ее содержание в материале не должно превышать 0,2–0,4%. При неправильной транспортировке или хранении полимера при повышенной влажности содержание влаги в полимере или смеси может возрасти настолько, что приведет к невозможности их использования для переработки. Повышенное содержание влаги композиции вызывает образование в экструдате пузырей и шероховатости поверхности. Удаление влаги и других летучих веществ на двухшнековых экструдерах производится через зону дегазации с помощью вакуум-насоса; в этой зоне давление падает

благодаря особой конструкции нарезки шнеков и правильной организации температурно-скоростного режима экструзии.

Большое значение для переработки ПВХ имеет его термостабильность, являющаяся показателем поведения материала под действием температур переработки. Термостабильность характеризуется временем, в течение которого влияние определенной высокой температуры не вызывает заметных изменений окраски полимера. При наличии в макромолекулах полимера дефектов или примесей с низкой температурой плавления термостабильность полимера снижается. Распространенными методами определения термостабильности являются использование пластографа «Брабендер» и капиллярных вискозиметров. Эти методы рассмотрены в главе 3.

7.1.2. Стабилизаторы

Под воздействием тепла и света ПВХ подвержен термо- и фотодеструкции, сущность которых состоит в том, что при температуре переработки, близкой к температуре разложения ПВХ, от молекул полимера отщепляется хлористый водород и образуются свободные радикалы, после чего под действием кислорода воздуха начинаются окислительные процессы. При деструкции изменяется окраска полимера и ухудшаются его механические свойства. Для предотвращения деструкции связыванием свободных радикалов в полимер вводят стабилизаторы.

Для повышения термостабильности полимеров используют термостабилизаторы. При выборе стабилизаторов важно учитывать технологию переработки материала и эксплуатационные характеристики готового продукта, а именно: совместимость стабилизатора или продуктов его реакции со всеми компонентами, входящими в состав смеси; стойкость к воздействию высоких температур и летучесть; склонность к образованию отложений на поверхности рабочих органов машины и оснастки; влияние на электрические свойства; поведение при длительном воздействии воды; отсутствие запаха, вкуса, стойкость окраски.

Оптимальные результаты по стабилизации могут быть достигнуты только при использовании систем стабилизаторов. Часто применение систем стабилизаторов в сочетании с антиоксидантами и с другими компонентами смеси приводит к синергическому (усиливающему) действию и, следовательно, к улучшению эффекта стабилизации по сравнению с действием отдельных стабилизаторов, входящих в систему.

Стабилизатор придает термическую стабильность молекуле ПВХ, но одновременно становится катализатором реакции отщепления HCl, образуя хлориды металлов. Следовательно, хорошая система стабилизаторов должна содержать вещества препятствующие эффективному действию хлоридов металлов, к которым относятся синергически действующие комплексообразователи (например, органические фосфиты), связывающие хлориды металлов. Усиление эффективности стабилизаторов вызывают также антиоксиданты — вещества, которые способны связывать кислород вызывающий отщепление хлористого водорода.

Для предотвращения фотохимической деструкции готовых изделий в композиции вводят светостабилизаторы. Наиболее эффективны светостабилизаторы, максимум абсорбционной активности которых приходится на область длины волны в пределах 310 нм. •

Применяемые для ПВХ стабилизаторы можно разделить на несколько классов: свинецсодержащие, оловоорганические, кальций-цинковые, барий-кадмиевые, органические стабилизаторы, светостабилизаторы, комплексообразователи. Каждый из этих классов образует широкие подгруппы, включающие производные основного металла. Выбор типа или системы стабилизаторов зависит от требований, предъявляемых к свойствам готовых изделий и режимам переработки материала, от степени вредности при приготовлении смесей и использовании готовых изделий. По последнему показателю стабилизаторы на основе солей тяжелых металлов постепенно вытесняются менее вредными: практически полностью прекратилось использование барий-кадмиевых стабилизаторов, многие европейские страны уже отказались или планируют отказаться от стабилизаторов, содержащих свинец, и перейти на мало токсичные, но менее эффективные кальций-цинковые стабилизаторы.

По поводу применения свинецсодержащих стабилизаторов продолжается дискуссия относительно степени его экологической вредности. Признано, что при приготовлении смесей с использованием порошкообразных свинцовых стабилизаторов, необходимо соблюдать меры предосторожности, так как даже при весьма малых концентрациях в воздухе они способны вызывать тяжелые отравления. Для борьбы с этим явлением зарубежные компании, производящие стабилизаторы и другие добавки для ПВХ, предлагают использовать комплексные стабилизаторы, в которые кроме смеси свинецсодержащих стабилизаторов вводят смазки, подобранные для каждой системы и доказавшие свою эффективность. Состав комплексных стабилизаторов является секретом фирм и не расшифровывается, предлагается только торговое название стабилизатора.

Стабилизация ПВХ оказывается тем эффективнее, чем более продумана система стабилизаторов и чем более равномерное их распределение в смеси.

7.1.3. Пластификаторы

Температура стеклования ПВХ составляет 70–80 °С. Ниже этой температуры ПВХ без введения специальных мягчителей обладают сравнительно малой прочностью на удар, что устраняется добавлением веществ, ослабляющих межмолекулярные силы связи. Эти вещества называются пластификаторами, а процесс введения пластификаторов в материал — пластификацией. Следует отметить, что пластификация — это химический термин и связан он с введением пластификаторов в отличие от термина «пластикация», который ассоциируется с пластичностью, являющейся физико-механическим процессом. Считаем не лишним напомнить об этом, так как иногда термин «пластикация» неправильно заменяют «пластификацией».

Различают внешнюю, структурную и полимерную пластификацию полимера. Для понижения температуры стеклования и придания полимерным молекулам подвижности используют внешнюю пластификацию. Уменьшение межмолекулярных сил связи путем добавления мономеров другого типа способствует структурная пластификация; при смешении ПВХ с другими полимерами можно получить полимерную пластификацию.

Наиболее широкое техническое применение имеет способ внешней пластификации. Пластификаторы для внешней пластификации помимо снижения температуры

стеклования и повышения гибкости изделий при температуре эксплуатации должны иметь хорошую совместимость с полимером для исключения выпотевания пластификатора, придавать ПВХ хорошую способность к желатинизации, светостойкость, иметь низкую летучесть и повышенную стойкость к действию экстрагирующих веществ, обладать высокой термостабильностью, морозостойкостью, слабой воспламеняемостью, стойкостью к миграции, обладать нетоксичностью, отсутствием запаха, иметь хорошие диэлектрические свойства [3]. Естественно, такого идеального пластификатора в природе не существует. При выборе пластификаторов всегда следует находить компромиссное решение, удовлетворяющее большинству требований, особенно противоположного характера. Для достижения оптимального эффекта в большинстве случаев прибегают к использованию комбинаций пластификаторов, при этом важно учитывать свойства других компонентов смеси, например, способность наполнителей поглощать пластификаторы.

Номенклатура пластификаторов огромна, и выбор типа пластификатора или группы пластификаторов определяется как техническими, так и экономическими соображениями. Наиболее распространены в качестве пластификаторов для ПВХ эфиры фталевой и фосфорной кислот, хлорированные парафины, эфиры адипиновой, лаиновой и себациновой кислот, полимерные низкомолекулярные пластификаторы [3]. Для изделий с высокой стойкостью к миграции пластификаторов хорошие результаты дают хлорированные парафины с содержанием атомов хлора в пределах 52–56%. Структурная пластификация также способствует уменьшению миграции пластификаторов, так как при такой пластификации полимер ПВХ не содержит летучих и легко экстрагируемых веществ. Однако такая мягкая композиция имеет пониженную термостабильность, а изделия из нее — низкую химическую стойкость, повышенную газо- и паропроницаемость.

Обычно пластифицированные композиции перерабатываются в гранулированном виде на одношнековых экструдерах, и производители изделий редко сами готовят мягкие композиции даже при наличии смесительного оборудования. Приведенные выше сведения полезны потребителям мягких композиций ПВХ в целях выбора подходящих марок и рецептов из их огромного многообразия, производимого отечественной промышленностью и зарубежными поставщиками. В настоящее время честные производители пластиков обычно не дают никаких сведений по составу рецептов (в 70–80-х гг. прошлого века состав композиций иногда приводился в технических условиях на материал), но специалист может определить примерный состав косвенным путем, кроме того, зарубежные поставщики в проспектах и рекомендациях приводят некоторые сведения по составу.

7.1.4. Смазки

Смазки облегчают переработку жестких и пластифицированных композиций ПВХ. В качестве смазок применяют вещества, способные благодаря своему химическому строению улучшать реологические свойства ПВХ, при этом большое значение имеет правильный выбор типа смазки и их весовое содержание в смеси.

Состав рецептуры композиции и условия переработки определяет выбор смазки по агрегатному состоянию, совместимости с полимером, стабилизаторами и пласти-

фикаторами и эффективности их воздействия на переработку смеси. Разнообразие требований, предъявляемых при выборе смазывающих добавок, делает необходимым поиск компромиссных решений. Оптимальный эффект обычно достигается при использовании комбинации нескольких смазывающих веществ.

Действие смазочных веществ основано на присутствии в них цепей алифатических углеводородов. К смазкам относятся натуральные и синтетические парафины, полиэтиленовые воски, жирные спирты и кислоты (стеариновая и пальметиновая кислоты, пальметиновый спирт), производные жирных кислот (стеарат кальция, эфиры стеариновой кислоты, эфиры горного воска, бутилстеарат, моно- и тристеарат глицерина), смеси углеводородов, эфиров и т. д.

По способу действия смазочные добавки разделяются на внутренние и внешние. Внешние смазки препятствуют прилипанию расплава к деталям перерабатываемого оборудования. Внутренние смазки благодаря их хорошей совместимости с ПВХ снижают вязкость расплава смеси. Существуют также переходные типы смазок. Максимальная эффективность смазок достигается путем выбора удачных комбинаций внутренних и внешних смазок.

Испытание композиций с различными смазками проводят на пластографе «Брабендер», экструзиометрах, лабораторных вальцах. Но эти испытания не могут заменить производственных испытаний на промышленном оборудовании.

7.1.5. Наполнители

Наполнители применяют для ПВХ в тех случаях, когда тип наполнителя и его объемное содержание позволяет достичь желаемых эффектов. При использовании наполнителя для снижения стоимости смеси важно не ухудшить качество полимера. Поскольку при наполнении смеси минеральными наполнителями плотность ее повышается, то выигрыш от экономии полимера может снижаться за счет ухудшения прочностных характеристик, в первую очередь ударной вязкости.

Для экструзии профильных изделий в качестве наполнителя используют гидрофобный мелкодисперсный мел, каолин, асбест и другие неорганические наполнители. В последние годы в качестве наполнителя почти исключительно используется мел с полимерным покрытием, которое препятствует интенсивному износу перерабатываемого оборудования. Мел без покрытия для переработки композиции на новом оборудовании не рекомендуется, так как значительно увеличивает износ шнеков, цилиндров и деталей оснастки [4].

В большинстве случаев введение в смесь наполнителей повышает твердость изделий, способствует стабилизации формы и размеров профиля в широком диапазоне температур, особенно усадку при прогреве, но при наполнении снижается прочность на удар, особенно при низких и отрицательных температурах, а также погодостойкость изделий, поэтому при выборе типа наполнителя и его содержания в смеси необходимо учитывать назначение изделия и условия его длительной эксплуатации.

7.1.6. Красители и пигменты

Для получения окрашенных изделий в композицию добавляют красящие вещества, которые гомогенизируют методом сухого смешения под действием сдвиговых уси-

лий. Для переработки ПВХ в качестве пигментов чаще всего применяют нерастворимые красящие вещества.

Различают органические и неорганические пигменты. К обеим группам пигментов предъявляются высокие требования в отношении свето- и погодостойкости, стойкости к действию высоких температур переработки, диспергируемости, совместимости со стабилизаторами, красящей способности и т. д. Использование порошкообразных красителей позволяет получать изделия с любой окраской, но требует применения специальных дозаторов, в связи с чем в настоящее время от такой окраски за рубежом в большинстве случаев уже отказались.

Использование концентратов красителей в гранулированном виде позволяет избежать загрязнения смесительного оборудования и в ряде случаев не требует применения специальных дозирующих устройств. Концентрат красителя, представляющий собой гранулированную концентрированную смесь полимера и красителя, может добавляться в бункер экструдера в необходимых пропорциях. Дальнейшее смешивание происходит в цилиндре экструдера, давая вполне приемлемое равномерное окрашивание расплава, и только при высоких требованиях к однотонности окраски применяют специальные дозирующие устройства.

7.1.7. Огнезащитные добавки

При непосредственном действии пламени происходит плавление ПВХ, однако при вынесении из пламени дальнейшего изменения материала (например, тления) не происходит. Поэтому ПВХ считают самозатухающим или трудновоспламеняемым материалом. Пластифицированные композиции менее стойки к действию пламени, и при высоком содержании пластификаторов материал продолжает гореть при вынесении из пламени.

Для повышения огнестойкости изделий из композиций ПВХ в них вводят специальные огнезащитные добавки — ретарданты или антипирены. Описание и свойства различных добавок для полимеров приведено в [5, 6].

7.1.8. Приготовление композиций ПВХ

Композиции ПВХ получают путем смешения полимера с описанными выше добавками, качество смешения зависит от температуры и времени. Для получения смесей типа «*dry blend*» применяют двухступенчатые высокоскоростные лопасти турбосмесители. В результате трения между частицами смешиваемых компонентов температура смеси постепенно растет; когда она достигает определенного уровня (125–140 °C) верхний «горячий» смеситель отключают и смесь пересыпают в нижний охлаждаемый смеситель для охлаждения, а из него в промежуточную емкость для дозревания. В современных двухступенчатых смесителях стадия смешения продолжается 7–8 мин, в течение 1 ч в смеситель можно осуществить 8–9 загрузок.

Стадия дозревания является обязательной. Она может продолжаться до суток. Продолжительное «созревание» необходимо для более равномерного распределения компонентов в смеси и поглощения полимером жидких и порошкообразных добавок. Изготовители композиций, которые игнорируют эту стадию, рискуют получить проблемы при переработке, такие как наличие комков или неоднородность реологических свойств.

7.1.9. Особенности экструзии ПВХ

При производстве изделий из ПВХ материал находится в различных физических состояниях: вязкотекучем (пластическом) состоянии (течение в каналах экструзионной головки и формование экструдата); переходном от пластического к высокоэластическому или стеклообразному состоянию (калибрование заготовки); стеклообразном или высокоэластическом состоянии — при отводе, резке и приемке изделия. В табл. 7.2 приведены температурные области жесткого и пластифицированного ПВХ.

7.1.9.1. Экструзия пластифицированного ПВХ

Для переработки мягкого ПВХ в гранулированном или агломерированном виде чаще используют одношнековые экструдеры, но возможно применение и двухшнековых машин. Возможно также питание одношнековых экструдеров порошкообразной смесью. В последнем случае в загрузочной воронке экструдера должна быть установлена лопастная мешалка, препятствующая отложению недостаточно сыпучей смеси на стенках бункера, или установка вибрационного или шнекового дозатора.

Производительность экструдера зависит от насыпной плотности материала. При питании экструдера гранулами производительность выше, чем при переработке порошкообразной смеси. Для переработки ПВХ с малой насыпной плотностью требуются экструдеры с повышенной длиной шнека и высокой степенью сжатия.

Использование экструдеров с дегазацией позволяет удалять воздух и летучие вещества из материала и значительно улучшать качество продукции.

При изготовлении профильных изделий из пластифицированного ПВХ следует иметь в виду, что расплав материала обладает высокой адгезией к металлу, поэтому калибрование в обычном понимании для резиноподобных материалов типа пластифицированного ПВХ не применяют. Возможно ограниченное применение калибрования для полужестких композиций, причем между поверхностью экструдата и калибрующей втулкой должен быть зазор, заполненный водой, так как подобное «калибрование» производят в охлаждаемых водой ваннах, преимущественно вакуумных, в которых за счет разрежения в ванне устраняются утечки воды через торцевые зазоры. Возможно также охлаждение экструдата на ленточном транспортере при воздушном охлаждении или водяном душировании.

Поскольку изготовление мягких профилей производится при повышенной вытяжке экструдата с одновременным его охлаждением, то в изделиях развиваются значительные высокоэластические деформации, которые могут быть причиной повышен-

Таблица 7.2. Температурные области физических состояний ПВХ

Температурная область	НПВХ, °С	Пластифицированный ПВХ (40 в. ч. пластификатора), °С
Температура стеклования	78	-40
Диапазон температур применения	10-70	-35...+70
Область высокоэластичности	80-160	-35...+140
Область вязкотекучести (пластичности)	160-210	140-170
Температура разложения	200	170

ной продольной усадки изделия при прогреве. Реологические свойства некоторых марок ПВХ-пластиков рассмотрены в [7].

Для переработки пластифицированного ПВХ важно подобрать подходящий температурный режим переработки, так как при слишком низкой температуре возможно ухудшение физико-механических свойств, а при высоких возникает опасность разложения материала и выделения хлористого водорода. Оптимальными температурами переработки мягкого ПВХ считают диапазон 160–170 °С, хотя некоторые рецептуры могут удовлетворительно перерабатываться и при более низкой температуре, в зависимости от типа полимера и добавок, входящих в состав рецептуры. В табл. 7.3 приводятся примеры рецептур для производства некоторых видов экструзионных изделий [8].

Таблица 7.3. Примеры состава рецептур ПВХ для производства различных изделий

Компонент	Название, марка	Содержание, в. ч.
<i>Рецептура для поливочных садовых шлангов</i>		
Полимер	Суспензионный ПВХ Hostalit C4070	66
Пластификаторы	Диоктилфталат (ДОФ)	32
	Эпоксидный	2
	Ва-Cd, твердый	1
Стабилизатор	Воск Е	0,1
Смазки	Стеариновая кислота	0,1
	В зависимости от окраски	0,005
Пигменты		
<i>Рецептура для уплотнительных строительных профилей</i>		
Полимеры	Суспензионный ПВХ Hostalit C4070	50
	Эмульсионный ПВХ E2069	20
Пластификатор	ДОФ	25
	Двухосновой фосфит свинца	1,5
	Двухосновой стеарат свинца (ДОСС)	1,2
Смазки	Воск Е	0,3
	Стеариновая кислота	0,2
Наполнитель	Мел	10
<i>Рецептура для полужестких мебельных профилей</i>		
Полимер	Эмульсионный Hostalit E2069	80
Пластификаторы	ДОФ	9
	Дионилфталат	9
	Хлорпарафин 52 (жидкий)	2
Стабилизаторы	Свинцовый (жидкий)	1,5
	Стеарат кальция	0,5
Смазки	Сложный эфир жирной кислоты	1,2
Наполнитель	Мел	10
Краситель	В зависимости от цвета	—

7.1.9.2. Экструзия непластифицированного ПВХ

Композиции непластифицированного ПВХ могут перерабатываться в гранулированном или порошкообразном виде. Гранулированные композиции чаще перерабатываются на одношнековых экструдерах, порошкообразные — на двухшнековых. Композицию считают непластифицированной при содержании пластификатора в смеси не более 10 в. ч. Иногда непластифицированной считают композиции с содержанием пластификатора до 2 в. ч., а до 10 в. ч. — жесткой. Четкой границы между ними нет, и термины «непластифицированная» и «жесткая» могут применяться в обоих случаях.

Порошкообразные композиции с хорошей сыпучестью могут перерабатываться и на одношнековых экструдерах, но производительность процесса в этом случае ниже и наблюдается повышенная запыленность оборудования, которая может влиять на качество изделий и условия работы обслуживающего персонала.

В связи с разнообразием рецептур непластифицированного ПВХ, конструкций машин и типов технологической оснастки невозможно привести точные температурные режимы переработки материала. Можно дать только приблизительный диапазон переработки НПВХ — 170–200 °C.

В табл. 7.4 приведены марки гранулированного НПВХ «Benvic» фирмы *Solvay*, которые широко используются отечественной промышленностью. Кроме того, фирма *Solvay* создала в 2004 г. производство ряда марок НПВХ в Волгограде и Твери [9]. Физико-механические и термические свойства наиболее распространенных для производства профильных изделий групп НПВХ фирмы *Solvay* — *Benvic EH* и *Benvic ER* приведены в табл. 7.5 и 7.6.

Переработку гранулированных композиций НПВХ осуществляют на одношнековых машинах с использованием глубоких шнеков длиной 20–25 *D* с плавно уменьшающейся глубиной нарезки и степенью сжатия около 2–2,5. Хорошие результаты дает также применение барьерных шнеков, которые применяются в настоящее время для переработки большинства термопластов.

При установке температур по зонам цилиндра и головки необходимо учитывать время нахождения порции материала в экструдере, поскольку термостабильность материала ограничена и зависит от состава рецептуры, в первую очередь, от эффективности стабилизаторов.

Для успешной переработки НПВХ особое внимание необходимо уделять конструированию каналов экструзионных головок, не допуская застойных зон, обеспечивать равномерный выход расплава по ширине формирующей щели, не допускать высокой вытяжки расплава, так как прочность расплава рецептур НПВХ меньше, чем у других материалов, особенно при низких температурах.

Ниже приводятся некоторые рекомендации по конструированию экструзионных головок и калибрующих устройств для производства изделий из НПВХ.

7.1.9.3. Технологическая оснастка

Производство любого профильного изделия требует применения специальной экструзионной головки с соответствующей формой, размерами, организацией течения в переходных зонах. Получение различных по форме и размерам изделий на одной экструзионной головке возможно только в редких случаях при формировании профилей из заготовок простого сечения, что было рассмотрено в главе 6.

Таблица 7.4. Экструзионные гранулированные марки жесткого ПВХ *Benvic* (Solvay, Бельгия) [10]

Марка	E , МПа	$T_{\text{разм}}$, °С	Тип стабилизатора	Внешний вид материала в изделии	Области применения и свойства материала
ЕВ 506	—	—	Ca—Zn	—	Используется для чистки и консервации оборудования и оснастки
ЕН 302	3100	76	Sn, стойкий к УФ	Глянцевый	Профили строительного назначения; содержит модификатор ударопрочности
ЕН 641	2650	80	Ca—Zn	Глянцевый	Оконные профили; содержит модификатор ударопрочности
ЕН 829	2900	82	Pb	Глянцевый, окрашенный	Оконные профили; содержит модификатор ударопрочности
ЕН 965	2800	81	Pb	Глянцевый, белого цвета	Оконные профили; содержит модификатор ударопрочности
ER 060	—	82	Pb	Глянцевый, белого цвета	Строительные профили, главным образом рольставни
ER 306	3100	82	Pb	Высокий глянец, окрашенный	Оконные профили
ER 317	3400	83	Pb	Матовый	Профили строительного назначения, облицовочные панели; может использоваться для соэкструзии с ЕН 302 для многоцветных изделий
ER 322	3000	84	Pb	Глянцевый, окрашенный	Строительные и другие профили (рольставни)
ER 323	3000	83	Pb	Атласный	Строительные и другие профили (фурнитура)
ER 327	3000	83	Pb	Глянцевый	Профили строительного назначения, облицовочные панели; огнестойкий
ER 345	3000	84	Pb	Атласный, белого цвета	Профили строительного назначения, облицовочные панели
ER 377	3000	84	Pb	Высокий глянец	Строительные и другие профили (рольставни)

Окончание табл. 7.4

Марка	E, МПа	T _{разм} , °C	Тип стабилизатора	Внешний вид материала в изделии	Области применения и свойства материала
ER 425	2700	77	Sn	Высокий глянец	Стоительные и другие профили; имеет защитные и барьерные свойства (сайдинги)
ER 453	2950	74	Ca-Zn	Атласный	Строительные и другие профили (рольставни)
ER 454	3100	79	Ca-Zn	Матовый, белого цвета	Строительные и другие профили
ER 456	3100	79	Ca-Zn	Атласный, белого цвета	Строительные и другие профили
ER 490	3500	82	Pb	Матовый, белого цвета	Строительные и другие профили (рольставни)
ER 499	—	—	Pb	—	Используется для чистки и консервации оборудования и оснастки
ER 608	—	—	Sn	Глянцевый, прозрачный	Строительные и другие профили
ER 612	2850	76	Sn	Глянцевый, прозрачный	Строительные и другие профили
ER 820	3200	82	Pb	Глянцевый, белого цвета	Оконные профили
SolVin Vinidur 464SZ	Суспензионный графт-сополимер винилхлорида и акрилового эластомера				Экструзия профилей, труб и трубок, листов, жесткой пленки; разработан для экструзии оконных профилей с повышенной прочностью на удар и высокой погодостойкостью
SolVin 173GB (порошок)	ПВХ эмульсионный; для экструзии жестких изделий используется в смесях с суспензионным ПВХ; имеет высокую термостабильность, может перерабатываться при пониженных температурах; имеет высокую прочность на удар				Жесткие и мягкие трубки и профили (требуется соответствующая композиция)

Таблица 7.5–7.6. Физико-механические и термические свойства марок НППХ *Benvic EH*, *Benvic E*

Свойства	Стандарты	<i>Benvic EH</i>	<i>Benvic ER</i>
Физические свойства			
Плотность, кг/дм ³	ISO 1183	1,35–1,50	1,37–2,00
Твердость по Шору D	ISO 868	75–82	77–83
Температура размягчения по Вика В (при Р = 5 кгс), °С	ISO 306B50	66–82	66–83
Механические свойства			
Свойства при растяжении:			
– прочность на разрыв, МПа		>40	25–50
– предел текучести, МПа		35–45	20–50
– удлинение при разрыве, %		100–190	20–170
– модуль упругости при изгибе, МПа	ISO 178	2300–3000	> 3000
Прочность при ударе:			
– ударное растяжение при 23 °С, кДж/м ²	ISO 8256	600–850	350–700
– ударное растяжение при 0 °С, кДж/м ²	ISO 8256	300–600	150–450
– прочность на удар по Шарпи при 23 °С (радиус надреза брусков 0,1 мм), кДж/м ²	ISO 179 1eA	40–80	5–70
Термические свойства			
Классификация огнестойкости	DIN 4102	B2	B1–B2
Предельный кислородный индекс, %	LOI 4589-2	> 40	> 50
Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁻³ К ⁻¹	ISO 7991	6–8	4–6
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	ASTM C177	0,17	0,17

Конструирование экструзионных головок для производства профильных изделий является больше искусством, чем наукой, поскольку практически не существует простых выражений для расчета формы и размеров каналов в переходных зонах головок обеспечивающих равномерное выдавливание расплава из головки. Использование базовых уравнений, на основе которых производят расчеты по методу конечных элементов (МКЭ), трудоемко и требует применения специализированных прикладных программ. Эти программы дороги (50–80 тыс. долларов) и применяются пока только в крупных специализированных фирмах.

Любой профиль достаточно сложной геометрической формы предъявляет следующие требования к экструзионной головке [11]:

- головка должна иметь жесткую конструкцию, чтобы форма и размеры канала не изменялись под действием высоких давлений, развиваемых при течи расплава ПВХ;

- детали головки, соприкасающиеся с расплавом, должны быть изготовлены из стойких к коррозии материалов, например, нержавеющей стали;
- средние скорости течения расплава через параллельные каналы на выходе из головки должны быть примерно одинаковыми.

Кроме того, при конструировании головки необходимо учитывать влияние на процесс течения типа экструдера (одношнековый или двухшнековый), формы входа в головку, реологические свойства композиции, допуски на размеры профильного изделия.

В большинстве случаев любая экструзионная головка требует многократного испытания и доводки по методу проб и ошибок. В ряде случаев стоимость доводки может составлять 20–30% и более от стоимости изготовления головки.

Для производства профилей из НПВХ применяют, как уже упоминалось в главе 6, два типа экструзионных головок — блендовые и обтекаемой конструкции. Блендовые головки состоят из плит или шайб толщиной 20–25 мм, соединяемых между собой винтами. В США на головках блендовой конструкции производят более половины всех профилей из ПВХ.

Головки с обтекаемыми каналами могут представлять собой комбинированную конструкцию из корпусных деталей значительной длины и бленд, составляющих собственно фильеру. Выбор конструкции головки определяется возможностью изготовления каналов нужной конфигурации и стоимостью головки.

Для производства профиля в большом количестве рекомендуется использовать головки обтекаемой конструкции, в которых отсутствуют застойные зоны, где ПВХ может деструктировать при повышенной температуре. В обтекаемых головках меньше давление и неравномерность течения потоков.

Длина головки и число бленд (плит) зависит от размеров и степени сложности профиля.

В адаптере или переходной зоне, расположенной между цилиндром и фильерой, форме внутренних каналов головки придают обтекаемую плавную конфигурацию, особенно для сложных профилей. Вход в головку должен быть хорошо обтекаемым, а его форма и размеры участвуют в общем расчете головки.

При экструзии профилей из пластифицированного ПВХ адаптер головки может использоваться для получения ряда аналогичных или близких по форме профилей, но для жесткого ПВХ требуется индивидуальный обтекаемый адаптер, плавно соединяющийся с переходными деталями и фильерой, особенно если при доводке возможно появление застойных зон, где может происходить разложение ПВХ. Перед окончательной доводкой фильеры следует испытать адаптер, поскольку от работы адаптера зависит время и стоимость доводки головки в целом.

Обтекаемость каналов головки устанавливается путем продолжительной работы с нетермостабильным материалом, в головках с застойными зонами цвет материала постепенно изменяется. После остановки экструдера и демонтажа головки устанавливаются места, в которых материал застывает, и вручную или машинным способом эти поверхности обрабатываются для устранения нарушений плавного непрерывного течения. После каждой доводки головку подвергают испытанию и устанавливают влияние изменения канала на характер течения материала.

При экструзии профилей из ПВХ длина формирующих каналов должна быть по возможности минимальной, поскольку с увеличением длины участка возрастает давле-

ние и время пребывания материала в головке, а это, в свою очередь, повышает опасность разрушения материала.

Точная длина формующего участка зависит от формы и размеров профиля, но в общем случае отношение длины формующего участка к толщине формующего зазора должно находиться в соотношении 10:1, при высоких скоростях экструзии это отношение может достигать значения 15:1 или даже 20:1.

Отношение l_{ϕ}/h_{ϕ} зависит также от агрегатного состояния перерабатываемого материала. Для гранулированного ПВХ это отношение не превышает 20:1, для порошкообразных композиций — от 20:1 до 30:1. Поскольку порошкообразные композиции перерабатывают при температурах на 10–15 °С выше гранулированных, это усложняет переработку материала на фильерах с короткими относительными длинами, что связано с изменением характера течения от стержневого к «вязкому» с более ярко выраженным параболическим профилем скоростей. Перестройка профиля скоростей тоже требует времени, поэтому удлинение формующего канала благоприятно влияет на «успокоение» расплава.

Углы наклона образующих канала в переходных зонах при переработке термостойких материалов не оказывают существенного влияния на характер течения; при переработке НПВХ эти углы рекомендуется выполнять не более 30–45°. Слишком крутые углы подъема увеличивают опасность застоя и разложения материала, хотя при соблюдении рекомендаций возникновение застойных зон возможно: например при локальном перегреве участков каналов или ухудшении качества обработки материала может возникнуть повышенная адгезия расплава к стенкам канала и постепенное разложение материала, поэтому необходимо следить за чистотой обработки деталей головки и за температурой переработки, не допуская перегрева материала.

7.1.9.4. Обеспечение равномерного выхода расплава по сечению фильеры

Очевидно, что головка должна конструироваться с учетом реологических свойств выбранной композиции [11], поскольку даже незначительное их изменение (например, от количества введенных смазок или других добавок) может потребовать корректировки размеров каналов обтекаемой головки. Но даже использование одной той же рецептуры ПВХ еще не гарантирует от корректировки формы и размеров каналов при получении профилей одинаковых по форме, но различных по размерам. Отличаться могут также реологические свойства композиций, приготовленных по одной рецептуре, но при разных замесах, поэтому рекомендуется смешивать в экструдере различные партии для выравнивания температуры расплава.

Обеспечение равномерного выдавливания расплава по сечению формующей щели является основным правилом при производстве ПВХ-профилей хорошего качества. Известны два способа выравнивания скоростей течения:

- путем изменения относительной длины формующего канала l_{ϕ}/h_{ϕ} ;
- путем изменения сопротивления формующей части какого-либо канала путем увеличения или уменьшения высоты на протяжении некоторой части его длины (сопротивление канала обратно пропорционально кубу его высоты).

Корректировка формующих длин — теоретически обоснованный метод достижения сбалансированного течения, но изменение формующей длины требует изгото-

ления новой детали или наращивание формирующей части фильеры с помощью заранее сделанных заготовок, предназначенных для этой цели.

Предварительный расчет головки с использованием основных реологических уравнений течения и реологических сведений о перерабатываемом материале позволяет определить необходимую длину формирующих участков фильеры и уменьшить количество доводок головки в дальнейшем. Расчетная длина формирующего канала может быть проверена путем измерения давления перед входом в канал и сравнением с теоретически найденным ΔP . Давление в головке не должно превышать 280 кгс/см^2 , так как иначе могут возникнуть утечки материала через возможные частичные раскрытия стыков между сопрягаемыми деталями. Теоретически найденная длина формирующего канала примерно должна соответствовать отношению $l_{\text{ф}}/h_{\text{ф}} = 10:1$.

Основные уравнения течения удовлетворительно работают для относительно широких профилей (при отношении ширины канала к его высоте более 10), но они вносят существенную погрешность при определении формирующей длины для профилей, размеры которых меньше диаметра шнека. Более подробно расчет экструзионных головок для сбалансированного течения при экструзии профильных изделий рассмотрен в главе 6.

7.1.9.5. Регулирование скоростей течения температурой

Другим способом регулирования скоростей течения потоков в головке является изменение температуры отдельных деталей головки. Все головки имеют нагревательные элементы; температура головки контролируется и регулируется с помощью термомпар, установленных в соответствующих тепловых зонах головки.

Известно, что головки выполняют либо с цилиндрическим корпусом, либо с прямоугольным, в зависимости от чего применяют цилиндрические бандажные или прямоугольной формы нагреватели. Цилиндрические головки пригодны для изготовления небольших симметричных профилей; нагреватели в таких головках определяют в основном температуру внешних кромок изделия и не дают хороших результатов при экструзии больших или несимметричных профилей. Чаше применяют прямоугольные головки, которые снабжаются плоскими нагревателями (по одному с каждой стороны) с тепловыми зонами для верхней и нижней частей головки и одной зоной для боковых сторон.

При производстве больших профилей применяют двухзонные головки. Например, при экструзии профиля шириной 300 мм на экструдере с диаметром шнека 90 мм путь течения материала к краям профиля существенно больше, чем в центральной части. Кроме того, между материалом и поверхностью канала головки имеется трение, препятствующее течению, что требует повышения температуры деталей в частях головки, где течение материала замедляется. При экструзии сложных профилей (например, с полками или перегородками) при температуре около 180°C головку следует нагревать несколько выше, чем расплав (до $182\text{--}185^\circ\text{C}$); в этом случае скорости течения в центральных и периферийных зонах головки выравниваются.

В ряде случаев во избежание разложения материала температуру нагрева головки занижают, но это приводит к другим трудностям, в частности, в начале работы при запуске профиля; к тому же это охлаждает периферийные зоны головки и вызывает большую несбалансированность течения, чем обычно. При экструзии очень широких

профилей, когда повышение температуры выше 195°C нежелательно, рекомендует-ся использовать головки с минимально возможной длиной губок, чтобы уменьшить время воздействия высокой температуры на расплав.

На температуру расплава влияют также шнек экструдера и температура корпуса или адаптера головки. В некоторых случаях технологи увеличивают скорость вращения шнека, что увеличивает производительность, но приводит к возрастанию скорости сдвига и к генерации тепла за счет внутреннего трения, а следовательно, к повышению температуры и неравномерному течению потоков, а также вызывает опасность разрушения материала. С другой стороны, изменение конструкции корпуса головки или увеличение длины шнека является эффективным способом улучшения течения расплава в экструзионной головке.

7.1.9.6. Влияние формы профиля

Одним из основных факторов, влияющих на конструкцию профильной головки, является форма и размеры самого профиля. Ширина и толщина стенок профиля определяют скорости течения материала в головке.

Формующие каналы головки для экструзии профилей из ПВХ должны быть тщательно обработаны, так как во многих случаях именно они определяют конечную форму профиля. Последующие воздействия на экструдат, такие как калибрование и охлаждение, придают изделию окончательные форму и размеры, но при этом в изделии образуются остаточные напряжения, которые способствуют снижению теплостойкости изделия при эксплуатации.

Однако при производстве большинства изделий без калибрования и охлаждения не обойтись. Более того, калибрующие устройства имеют различную конструкцию при экструзии профилей с одинаковой толщиной стенок участков и разнотолщинных, поскольку толстостенные и тонкостенные участки профиля охлаждаются с различной скоростью, что приводит к его короблению. Для компенсации неравномерности течения в головках некоторые переработчики вытягивают одни элементы профиля и тормозят другие, но точно подобрать различные степени вытяжки участков трудно, а вытяжка может приводить к снижению качества изделия: например, повышенная вытяжка снижает погодостойкость профилей, используемых в наружных конструкциях.

В общем случае при экструзии профилей из НПВХ степень вытяжки не должна превышать 1,1. Поскольку разбухание экструдата для жестких композиций также составляет примерно 1,1, то толщину формующего зазора сечения фильеры можно принимать равной номинальной толщине стенки профиля. Изменение свойств композиции или типа экструдера заметно не влияют на это соотношение. Более подробно вопрос о размерах формующего инструмента рассмотрен в главах 4 и 6.

При экструзии разнотолщинных профилей несбалансированность течения должна устраняться путем изменения конструкции каналов головки, а не за счет повышенной вытяжки экструдата. Возникающее в таких головках двухмерное течение вызывает поперечное перетекание расплава из области высокого давления в области с более низким давлением, в результате чего оказывается весьма затруднительно выравнивать потоки по участкам.

Интенсивность поперечного течения зависит от формы профиля (числа стыков и места их расположения) и конструкции каналов фильеры, ответственных за формо-

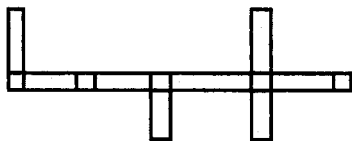


Рис. 7.1. Конструкция профильного изделия, в местах соединения полок которого возможны локальные перетекания расплава

вание соответствующих участков. На рис. 7.1 показан профиль с различной формой стыков участков. Наименьшее влияние на поперечное течение оказывают форма и размеры широкого канала, тогда как влияние боковых ответвлений более существенно. Перераспределение потоков может вызвать даже небольшое увеличение или уменьшение толщины зазора поперечных участков, и форму экструдата при этом трудно предсказать.

Регулированием длины формующей части фильеры можно влиять и на толщину стенки профиля. Например, при экструзии профиля с толщиной стенок участков 3 и 0,8 мм длины формующих каналов принимаются соответственно равными 50–63 мм и 9–12 мм. Кроме того, характер течения можно улучшить, уменьшив зазор с 3 до 2,6 мм и увеличив зазор с 0,8 до 1,3 мм. Конечные размеры профиля при этом получаются соответственно по 3 и 0,8 мм [11].

Расширяя канал по краям фильеры или сокращая длину формующего участка на 50% и более, можно добиться равномерного выхода расплава по сечению.

7.1.9.7. Технологичность профиля

Во многих случаях можно избежать длительной доводки головки и сократить стоимость ее изготовления путем рациональной конструкции самого профиля, согласовав с заказчиком его технологичность еще на стадии рассмотрения конструкции изделия. Подробно общие вопросы технологичности профилей рассмотрены в главе 1. Ниже эти же вопросы рассматриваются применительно к нетермостабильному материалу, каким является НПВХ.

Для жестких профилей в большинстве случаев одинаковая толщина стенок является решающим фактором, позволяющим быстрее достичь сбалансированного течения в головке и снизить стоимость ее доводки. Для эластичных профилей этот фактор действует в меньшей степени. Часто для изделий с различной толщиной стенки участков трудно выдержать желаемые допуски на размеры из-за поперечных перетеканий материала.

Выравнивание толщины стенок может быть достигнуто различными способами, например, включением в профиль полостей, не влияющих на работоспособность изделия. В некоторых случаях внутренние полости заменяют перегородками, которые придают профилю большую жесткость.

Уменьшение толщины наружной стенки и введение выступов на внутренней стенке также способствует более равномерному течению расплава и обеспечивает профилю дополнительную жесткость. Поскольку выступы снаружи не видны, их применение предпочтительно для профилей, внешний вид которых является важным показате-

лем. Выступы можно также применять и с наружной стороны профиля для уменьшения и даже устранения утяжек [11, 12].

При необходимости оставить профиль с участками различной толщины стен следует придерживаться правила: соотношение между максимальной и минимальной толщиной должно быть не более чем 1,5.

Для профилей с внутренними перегородками толщина стенок перегородок должна быть меньше наружных стенок не менее чем на 20%. Это же касается и толщины стенок полок, находящихся во внутренних полостях. Кроме того, для уменьшения утяжек на стыке участков внутренние перегородки желательно выполнять под углом к основным стенкам.

Охлаждение внутренних перегородок производится в основном за счет теплопроводности через стенки других участков, и принимать меры к интенсификации охлаждения внутренних участков следует после первичных испытаний головки, так как невозможно заранее предусмотреть степень искажения элементов профиля.

Хотя внутренние полости часто уменьшают несбалансированность течения, введение полостей удорожает головку и требует применения определенных мер для охлаждения. Полости в профиле образуются за счет установки в головке специальных деталей-дорнов. Дорнодержатель и дорны должны быть обтекаемыми и, по возможности, короткими, чтобы уменьшить время пребывания в них расплава. Одни значные и точные рекомендации по длине дорнодержателя и его расположению в головке невозможны, однако с увеличением ширины профиля должно возрастать расстояние до отверстия на выходе: это позволяет обеспечить плавность течения материала в головке. Кроме того, полые профили требуют применения вакуумных калибрующих устройств для устранения неточностей формы экструдата, тогда как, например, плоскощелевые головки требуют совершенной конструкции, поскольку лист или плоская пленка не калибруются в известном значении этого слова.

Применение пустотелых или камерных профилей предпочтительнее по сравнению с толстостенными сплошными изделиями, так как полый профиль легко откалибровать с помощью вакуумного калибратора, тогда как толстостенный профиль после калибратора провисает, неравномерно деформируется, в нем возникают утяжки в местах сочленения участков.

В углах профиля следует предусматривать радиусы округления, это позволит избежать разрушения материала. Острые внешние углы трудно сохранить при extrusion профилей, поэтому минимальный радиус округления наружных углов составляет 0,4 мм; такой же радиус предусмотрен и для внутренних углов.

Одной из основных причин высокой стоимости головок для переработки ПВХ является применение дорогостоящих нержавеющих сталей и термообработки. Высокая твердость деталей затрудняет их обработку при доводке, что также отражается на общей стоимости оснастки. Например, головка для производства широкого листа ПВХ стоит примерно 10 тыс. долларов, а головка для профилей — от 1,5 до 30 тыс. долларов и более, причем стоимость оснастки резко возрастает с увеличением размеров профиля, так как металлоемкость головки также увеличивается [11].

Износ деталей происходит в любой extrusion головке, поэтому может возникнуть необходимость в корректировке формы и размеров деталей головки по некоторому времени ее эксплуатации. Признаком хорошей конструкции являе-

срок жизни головки: на хорошей головке можно изготовить до 1 млн пог. м профиля и более без корректировки или замены деталей.

7.2. Свойства и особенности переработки полиолефинов

Полиолефины, представителями которых являются полиэтилен, полипропилен, полибутилен и их сополимеры, относятся к числу наиболее распространенных термопластов. Из них методом экструзии получают пленку, трубы, шланги, листовые материалы, кабельные изделия, различные емкости, тару, профильные и другие изделия. Высокая химическая стойкость к большинству химически активных сред, высокая пробивная электрическая прочность и хорошие диэлектрические показатели, жесткость, стабильность размеров изделий в широком диапазоне температур, хорошая окрашиваемость, сохранение достаточно высокой прочности и эластичности при низких температурах — далеко не полный перечень свойств этого класса полимеров, производство которого в мире постоянно растет.

Профильные изделия чаще всего экструдируют из полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и его сополимеров, полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), полипропилена (ПП). Иногда применяется линейный полиэтилен низкой плотности ЛПЭНП (LLDPE). Профили из высокомолекулярного полиэтилена (ВМПЭ) производят методом плунжерной экструзии или механической обработкой полуфабрикатов из него — плит, стержней.

По сравнению с ПВХ полиолефины реже применяются для производства профилей, тем не менее они имеют свои области применения; например, если требуются хорошие диэлектрические свойства или высокая пробивная электрическая прочность, контакт с пищевыми продуктами, повышенная морозостойкость, стойкость к химически агрессивным средам.

7.2.1. Свойства

7.2.1.1. Полиэтилен

В зависимости от условий полимеризации различают три вида полиэтилена [13,14]: полиэтилен высокого давления (ПЭВД, или низкой плотности — ПЭНП), полиэтилен среднего давления ПЭСД и полиэтилен низкого давления ПЭНД (или высокой плотности, ПЭВП). Несмотря на то что различные виды полиэтилена получают из одного и того же мономера, они представляют собой совершенно различные материалы. Это объясняется разным строением макромолекул и разной способностью к кристаллизации. Например, ПЭНП состоит из разветвленных макромолекул и представляет собой мягкий и эластичный материал, ПЭСД и ПЭНД (ПЭВП), имеющие линейное строение и довольно высокую степень кристалличности (85–90%), — жесткие продукты.

Существенным недостатком полиэтиленов является быстрое старение под действием кислорода и УФ-излучения. Старение можно резко замедлить введением антиоксидантов, светостабилизаторов или химическим модифицированием [14].

Полиэтилен хорошо сваривается, что позволяет легко создавать сложные конструкции из отрезков изделий, кроме того, он широко применяется для защиты металлов методом газопламенного напыления.

ПЭНП. ПЭНП — полупрозрачный эластичный материал молочного цвета с хорошими диэлектрическими свойствами и низким водопоглощением [13–16].

Благодаря молекулярной структуре с разветвлениями разной длины цепи ПЭНП называется «полиэтиленом с разветвленной цепью». Материал относится к полукристаллическим и имеет степень кристалличности не выше 50–60%.

Температура плавления ПЭНП 103–110 °С, плотность 0,917–0,923 г/см³, прочность при растяжении 11,5–15,0 МПа, относительное удлинение при разрыве 550–600%, разрушающее напряжение при изгибе 12,0–20,0 МПа, предел текучести при растяжении 9,5–14,0 МПа, секущий модуль эластичности 90–215 МПа. Водопоглощение за 30 суток составляет не более 0,020%. Максимальная температура эксплуатации 60 °С.

Для экструзии используют высоковязкие (экструзионные) марки полимера с ПТР 0,3–2,0 г/10 мин ($T = 190$ °С; $P = 2,16$ кгс).

Химической модификацией ПЭНП получен линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП, PE-LLD, L-LDPE), который представляет собой легкий эластичный кристаллизующийся материал с теплостойкостью по Вика до 118 °С. Имеет большую стойкость к растрескиванию, ударную прочность и теплостойкость, чем ПЭНП, биологически инертен [13, 17–21].

Применяется в основном для производства плоской и рукавной упаковочной пленки, емкостей, контейнеров, в том числе и для пищевых продуктов.

В России производство отечественного ЛПЭНП в промышленных масштабах в настоящее время отсутствует. Свойства и производители зарубежных марок приведены в [20, 21], например, *Clearflex*, *Flexirene* (*Polymeri Europa*), *Dowlex* (*Dow*), *Escorene* (*Exxon Mobil*), *LLDPE* (*Borealis*), *Marlex* (*CPC*), *Sclair* (*NOVA Chemicals*), *Seetec LLDPE* (*Hyundai*).

Отечественный сополимер этилена с винилацетатом, получаемый совместной полимеризацией этилена и винилацетата в массе под высоким давлением, известен под торговой маркой Сэвилен, который выпускается в гранулированном виде (как базовые марки, так и композиции со стабилизаторами). Основной производитель в России — Казанский завод нефтеорганического синтеза. Сэвилен имеет большую эластичность и прозрачность, чем ПЭНП; его свойства зависят, в первую очередь, от содержания винилацетата: с его повышением кристалличность, прочность при растяжении, твердость и теплостойкость уменьшаются, а плотность, эластичность, прозрачность и адгезия возрастают. Для экструзии применяют марку 11104-030 с содержанием винилацетата 5–7%. Марка имеет плотность 0,925 г/см³, ПТР 1–5 г/10 мин, прочность при растяжении 11,3 МПа, относительное удлинение при разрыве 600%, теплостойкость по Вика 85–95 °С [16]. Широко используется при производстве винтовых шлангов разного диаметра из Z-образного профиля. Основное назначение таких шлангов — воздухоотсосы от различного оборудования.

ПЭВП. Полупрозрачный высококристаллический материал молочного цвета, обладает высокой упругостью расплава, имеет хорошую стойкость к большинству органических и неорганических кислот, щелочей и солей. Недостаточно стоек к хлор-

рованным углеводородам и материалам-окислителям. Температура плавления 125–135 °С, плотность 0,95–0,96 г/см³, температура размягчения по Вика 120–125 °С, предел текучести при растяжении 22–25 МПа, относительное удлинение при разрыве 250–700%, модуль эластичности при изгибе 680–850 МПа. Водопоглощение за 30 сут не более 0,03–0,04%. Максимальная температура эксплуатации 60 °С [13–17].

Для экструзии профилей применяют высоковязкие марки ПЭВП с ПТР 0,3–2,4 г/10 мин ($T = 190$ °С, $P = 5$ кгс). Отечественные марки ПЭВП соответствуют ГОСТу 16638-77.

Материал применяется для производства профилей относительно несложной формы.

Свойства ПЭВП связаны с молекулярной массой и кристалличностью полимера. При переработке молекулярную массу характеризует текучесть расплава (или его ПТР), а степень кристалличности — плотность изделия. В табл. 7.7 показано изменение свойств полиэтилена в зависимости от ПТР и плотности. Чем уже распределение по молярным массам (полидисперсность), тем хуже перерабатываемость, меньше остаточные напряжения в изделии и выше прочность расплава и предельная вытяжка.

Высокомолекулярный полиэтилен (ВМПЭ, PE-HMW, PE-UHMW). Высокомолекулярный полиэтилен (ВМПЭ) обладает комплексом свойств, существенно отличающих его от «обычного» ПЭВП [16, 22]:

- низкий коэффициент трения в сочетании с высокой механической прочностью позволяет использовать ВМПЭ для изготовления лыжной ленты, разнообразных профильных направляющих и подложек для транспортеров и конвейеров в пищевой и холодильной промышленности, листов для футеровки оборудования в горнорудной промышленности, кузовов автомобилей, бесшумных не смазыва-

Таблица 7.7. Влияние ПТР и плотности на изменение свойств ПЭВП [15]

Физические величины	Уменьшение ПТР	Возрастание плотности
Прочность на разрыв	Возрастает	Возрастает
Разрывное удлинение	Возрастает	—
Твердость, жесткость	—	Возрастает
Ударная вязкость образца с надрезом	Возрастает	Снижается
Длительная прочность	Возрастает	Возрастает
Склонность к «усталостным» трещинам	Снижается	—
Температура размягчения	—	Возрастает
Теплостойкость	Возрастает	Возрастает
Кристалличность	—	Возрастает
Стойкость против старения	Возрастает	—
Газонепроницаемость	—	Возрастает
Набухаемость в растворителях	Снижается	Снижается
Температура переработки	Возрастает	Возрастает
Производительность экструдера	Снижается	Снижается

- емых шестерней, деталей эндопротезов, блоков в виде стержней и плит для дальнейшей механической обработки и изготовления втулок, опор, направляющих
- высокая химическая стойкость позволяет применять ВМПЭ для изготовления деталей насосов в химической промышленности (взамен фторпластов), прокладок для агрессивных сред, сепараторов, аккумуляторов взамен мипора (ПХВ);
 - биологическая инертность и свойства, допускающие возможность стерилизации материала, позволяют применять ВМПЭ в медицинской и пищевой промышленности.

Показатели качества ВМПЭ, производителем которого в России является Томский нефтеперерабатывающий комбинат, соответствуют ТУ 2211-068-057 96653-98 и имеют следующие значения: плотность не менее $0,936 \text{ г/см}^3$, массовая доля золы не более $0,05\text{--}0,10\%$, содержание летучих веществ не более $0,25\text{--}0,50\%$, прочность на разрыв не менее 30 МПа , относительное удлинение при разрыве не менее 250% [22].

ВМПЭ выпускают в виде порошка без добавок (базовая марка) или с добавками по рецептурам, указанным в ГОСТе 16338. Цена 1 т ВМПЭ составляет $67\text{--}72 \text{ тыс. руб.}$

В табл. 7.8 приведены свойства некоторых импортных марок ВМПЭ.

7.2.1.2. Полипропилен

Представляет собой высококристаллический полимер с температурой плавления $164\text{--}170^\circ\text{C}$, обладающий повышенной механической прочностью, большой водохимической стойкостью, хорошей прозрачностью (неокрашенные марки) и блеском. Имеет высокую стойкость к растрескиванию. Плотность $0,90\text{--}0,91 \text{ г/см}^3$; прочностные характеристики при растяжении $29,0 \text{ МПа}$; предел текучести при растяжении $21,6\text{--}30,4 \text{ МПа}$; относительное удлинение при разрыве $300\text{--}700\%$; прочность на удар по Изоду на образцах с надрезом $4,9\text{--}29,4 \text{ Дж/м}^2$; модуль упругости при растяжении $1078\text{--}1127 \text{ МПа}$.

Температура хрупкости немодифицированных марок от -8 до -15°C ; коэффициент линейного расширения $1,60\text{--}1,10 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; удельная теплоемкость при $20\text{--}25^\circ\text{C}$ $1,93 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$; теплопроводность $880 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$. Водопоглощение за 30 сут составляет $0,01\text{--}0,09\%$. Усадка при литье под давлением $1\text{--}3\%$ [6, 16, 17, 24–26].

Для экструзии профильных изделий используются высоковязкие марки с $\eta_{\text{в}} 0,2\text{--}2,0 \text{ г/10 мин}$, например, 02П, 03П по ТУ 6-05-1105-73 — для экструзии труб, листовых материалов и других изделий, в том числе имеющих контакт с пищевыми продуктами; по ТУ 6-05-1756-78: 21007 — трубы, профили, листы; 22007 — трубы с повышенной прочностью на удар; 22015 — технические изделия с повышенной прочностью на удар.

Свойства полипропилена в значительной мере схожи со свойствами ПЭВП. Однако имеются и существенные отличия. Полипропилен имеет более высокую прочность, жесткость и твердость, но меньшую прочность на удар, особенно при низких температурах (для базовых марок). У модифицированных каучуком марок прочностные характеристики на удар выше, чем у ПЭВП [27–29].

В России полипропилен производится Московским, Омским, Томским и Гурьевским нефтеперерабатывающими заводами [6].

В табл. 7.9 приведены для сравнения основные свойства полиолефинов, применяемых для экструзии профильных изделий.

**Таблица 7.8. Физико-механические свойства ВМПЭ
с молекулярной массой 500 000 г/моль [23]**

Свойства	<i>CESTILENE HD 500</i>	<i>CESTICOLOR HD 500</i>	<i>CESTILENE HD 500 R</i>
Плотность, г/см ³	0,96	0,96	0,96
Максимальное водопоглощение, %	0,01	0,01	0,01
Температура плавления, °С	130–135	130–135	130–135
Коэффициент теплопроводности при 23 °С, Вт/(м · К)	0,40	0,40	0,40
Коэффициент линейного термического расширения при температуре 23–60 °С,	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Температура размягчения при изгибе под напряжением 1,8 МПа, °С	44	44	44
Диапазон рабочих температур, °С	–100...+80	–100...+80	–60...+80
Предел прочности при растяжении, МПа	28	28	28
Предел прочности при сжатии (5%-ная деформация), МПа	23	22	23
Максимальное удлинение при разрыве, %	50	50	50
Модуль упругости, МПа	1350	1350	1300
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² : без надреза	Без разрушения	Без разрушения	Без разрушения
с надрезом	25	25	20
Ударная вязкость по Бринеллю, МПа	45	45	45
Диэлектрическая проницаемость при 50 Гц	2,4	2,4	2,4
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ⁶ Гц	0,0002	0,0002	0,0002
Толщина стержней, мм	20–200	20–140	—
Толщина плит, мм	2–150	8–150	8–150

2. Оборудование и оснастка

1. Полиэтилен

Полиэтилен легко перерабатывается на стандартном экструзионном оборудовании без каких-либо существенных изменений в конструкции агрегатов, комплектующих линию.

Для переработки полиэтилена в основном используют одношнековые экструдеры с диаметром шнека 20...30D. Обычно для переработки полиэтилена используют трехзонный экструдер с короткой зоной сжатия (рис. 7.2) и степенью сжатия 2,5–3,5. Применяются также двухшнековые, у которых в зоне сжатия глубина нарезки постепенно уменьшается [30–32].

Таблица 7.9. Сравнительные свойства высоковязких полиолефинов [15, 16]

Характеристика	ПЭНП	ЛПЭНП	ПЭСП	ПЭВП	ВМПЭ	ПП
Плотность*, г/см ³	0,920	0,930	0,930	0,950	0,93–0,96	0,905
Степень кристалличности, %	35–40	–	65–75	70–90	–	60–70
Диапазон плавления, °С	98–110	–	115–137	128–135	132–135	160–165
Средний молекулярный вес × 10 ³	100	–	150	200	1000–3500	100
Степень разветвленности (CH ₃ /1000–С)	30–35	–	10–15	4–6	–	–
Модуль упругости при растяжении, Е, МПа	200–400	280–500	400–600	700–1400	1300–1350	1100–1500
Прочность при разрыве, МПа	7,5–13,5	10–17	8,5–24,5	18–29	28–44	26–38
Относительное удлинение при разрыве, %	500–600	650–750	–	500–700	50	300–700**
Твердость, МПа (шарик)	14–25	–	20–46	28–58	38–45	60–80
Прочность на удар на образцах с надрезом, кДж/м ² при 20 °С*	БР	БР	БР	БР**	БР	40
ПТР, г/10 мин, метод В ISO R292 (Т = 190 °С)	5–7	0,5–1,0	1	0,3–0,5	НД	0,5
Диапазон температур применения, °С	–70...+60	–40...+60	НД	– 40...+60	–100...+80	0...+100

* Средние значения.

** В зависимости от типа.

БР – без разрушения.

НД – нет данных.

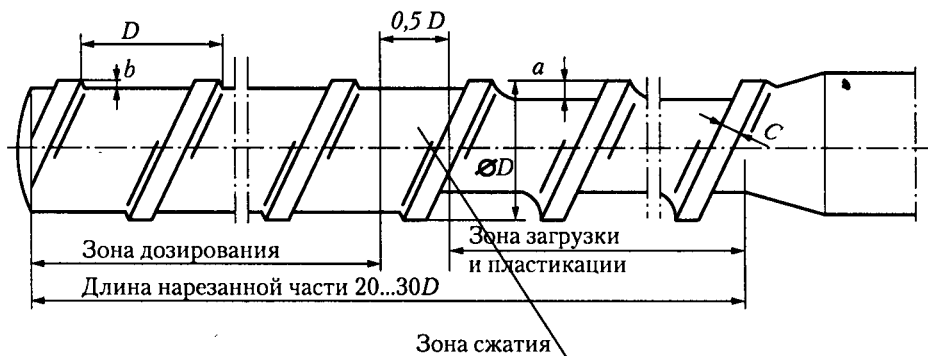


Рис. 7.2. Форма и размеры шнеков для переработки полиэтилена

Размеры шнеков для переработки полиэтилена:

D	C	a	b
45	6	6	2
60	8	9,75	3,25
90	12	13,50	4,5
120	14	15,75	5,25
150	16–18	16,50	5,5

В настоящее время в Европе и США чаще применяют шнеки барьерного типа со смешительными элементами, особенно при производстве пленок, раздувных изделий, листов. Возможно также применение пятизонных шнеков с зоной декомпрессии и с дегазацией расплава. Конструкции шнеков, применяемые в Европе и в Америке, рассматриваются в главе 2.

Экструзионные головки. Для производства профильных изделий используют экструзионные головки среднего сопротивления, в которых давление при переработке не превышает 150–200 атм. При изготовлении толстостенных изделий сопротивление течению, а с ним и качество изделий резко снижается, поэтому на входе в головку для создания дополнительного сопротивления иногда устанавливают решетки с пакетом сит. Рекомендуются сетки 20–200 меш (меш — количество отверстий на 1 см²) в зависимости от размеров каналов головки [30–32].

Поскольку полиэтилен — термостабильный материал, применение полностью обтекаемых каналов необязательно. Допускается использование блендовых головок с фасками в местах сопряжения деталей, образующих рабочий канал, однако чаще применяют головки с плавными переходами и длинной формующей зоной постоянных размеров.

Поперечное сечение канала зоны входа в формующий канал должно уменьшаться постепенно. Длина этого участка (конической или более сложной конфигурации) может составлять 30–50 мм. Плавные переходы в головке облегчают получение разнотолщинных профилей.

К существенным недостаткам ПЭВП, проявляющимся при формировании сложных профилей, относятся высокая упругость расплава и низкое сопротивление растяжению, высокий коэффициент трения расплава при температуре экструзии, повышенная чувствительность к неравномерному охлаждению и высокое теплосодержание.

Высокая эластичность расплава является причиной значительного разбухания экструдата и искажения формы участков профиля. Поскольку разбухание зависит от размеров формующих каналов и режимов течения, то изменение формы и размеров отдельных участков профиля неодинаково, в результате чего происходит искажение формы в целом.

ПЭВП относится к материалам, которые имеют высокую адгезию к металлу. Расплав полиэтилена хорошо смачивает стенки канала и при течении показывает параболический профиль распределения скоростей по высоте канала. Проскальзывание на стенке возможно только для высокомолекулярных марок с узким молекулярно-массовым распределением.

Некоторые производители вводят в полиэтилены процессинговые добавки, уменьшающие адгезию к металлу, изменяющие характер течения вблизи стенки на более равномерный, приближающийся к стержневому. Переработка таких марок существенно облегчается [33–34].

При вытяжке ширина экструдата изменяется визуально более заметно, чем толщина стенки. Это связано с тем, что разбухание по толщине стенки для ПЭВП всегда выше, чем по ширине или диаметру, поэтому при конструировании формующего инструмента ширину канала принимают примерно на 30% больше ширины профиля [30]. Вертикальные размеры формующего отверстия принимаются только на 15% больше конечных размеров профиля.

Длину формующей зоны для профилей с толщиной стенок 1,5–2,5 мм рекомендуют принимать равной $(20-25)h_f$ (h_f — высота формующего канала, прямоугольной, кольцевой или цилиндрической формы).

Для полиэтиленов характерна неблагоприятная зависимость коэффициента трения от температуры [35]. Область максимальных значений приходится на температуры переработки 70–200 °С, что создает определенные трудности для равномерной подачи материала шнеком и при калибровании экструдата. Перегрев зоны загрузки может привести к ситуации, когда гранулированный материал будет вращаться вместе со шнеком без поступательного перемещения. При высокой температуре расплава на входе в калибратор движущийся расплав тормозится поверхностью калибратора и начинает сильно вытягиваться, в результате чего сложно создать уплотнение на входе в вакуумный калибратор и прижать стенки полого профиля к охлаждаемой поверхности. Этому же способствуют высокое теплосодержание и теплоемкость ПЭВП.

При калибровании полиэтиленовых труб на входе в калибратор резко возрастает температура поверхности калибрующей втулки [36] и, соответственно, коэффициент трения расплава, в связи с чем для калибрования ПЭВП применяют относительно короткие вакуумные втулки с интенсивным охлаждением входа в калибратор и подачей воды на экструдат через тонкий щелевой зазор.

У ПЭВП меньше эластичность расплава и меньшее разбухание, чем у ПЭВП, а также меньше прочность расплава при продольной вытяжке. Кроме того, ПЭВП медленнее застывает, чем ПЭВП. Непосредственное охлаждение расплава струей воды в

некоторых случаях позволяет создать в экструдате определенную прочность для его протяжки без обрыва через набор пластин.

Эластические свойства некоторых марок полиэтилена, используемые при расчете размеров формующего инструмента, приведены в главе 6.

Из-за явно выраженного параболического профиля скоростей расплав полиэтилена течет быстрее в середине канала и медленнее по краям, что приводит к неравномерному разбуханию в середине и по краям прямоугольного экструдата («бочкообразность»). Кроме того, происходит скругление углов прямоугольных участков профиля. Для устранения бочкообразности форму отверстия фильеры на выходе выполняют с обратной бочкообразностью или несколько увеличивают высоту канала по краям, чтобы компенсировать различие в разбухании по краям и в середине.

Для ПЭНП не требуется тщательной полировки поверхности формующего канала, но на его поверхности не должно быть углублений, заметной шероховатости, следов от металлообрабатывающего инструмента, и особенно зазубрин и заусенцев на выходе из канала; это же относится и к подводящим каналам. Огрубление поверхности экструдата или наличие продольных рисок, вызванное указанными причинами, портит внешний вид изделия.

Углы формующего канала и края выходного отверстия рекомендуют [30] слегка скруглить радиусом 0,4–0,5 мм.

Для контроля за состоянием расплава на входе в головку могут быть установлены датчики температуры и давления расплава, позволяющие быстрее подбирать оптимальный режим переработки материала.

Детали головок, в принципе, могут быть изготовлены из обычных инструментальных сталей без хромирования или никелирования, поскольку расплав полиэтилена не является агрессивным и не вызывает коррозию металла, однако предпочтительнее все-таки детали хромировать или изготавливать их из нержавеющей стали, поскольку повышенная влажность в помещении или попадание воды при хранении может вызвать коррозию деталей и потребуются ее устранение.

Калибрование и охлаждение. Окончательную форму и размеры профиль приобретает при калибровании и охлаждении экструдата. В простейшем случае профиль можно охладить потоком воздуха от воздуходувки или цеховой сети сжатого воздуха (рис. 7.3) через специальные сопла или форсунки. Хотя теплоотдача от экструдата к воздуху невелика, таким способом можно получать тонкостенные профили из ПЭНП с одинаковой толщиной стенок. Центробежная воздуходувка Г создает в закрытом желобе Д турбулентный воздушный поток, что интенсифицирует процесс охлаждения. На выходе из желоба поддерживается небольшое разрежение. За счет разницы давлений создается сильная струя воздуха, дополнительно охлаждающая профиль; желоб Е длиной 400–500 мм, смонтированный на раме, можно изготовить из толстого органического стекла или стали. Вдоль желоба крепятся формующие ролики или пластины. Для охлаждения некоторых профилей достаточно установки только «воздушных» колец. При экструзии разнотолщинных изделий применяют дифференциальное охлаждение, создавая на толстостенных и тонкостенных участках потоки различной интенсивности; отбойники Ж формируют воздушный поток вокруг охлаждаемого профиля в целях интенсификации процесса охлаждения. Во второй камере З профиль охлаждается водяным душем через форсунки.

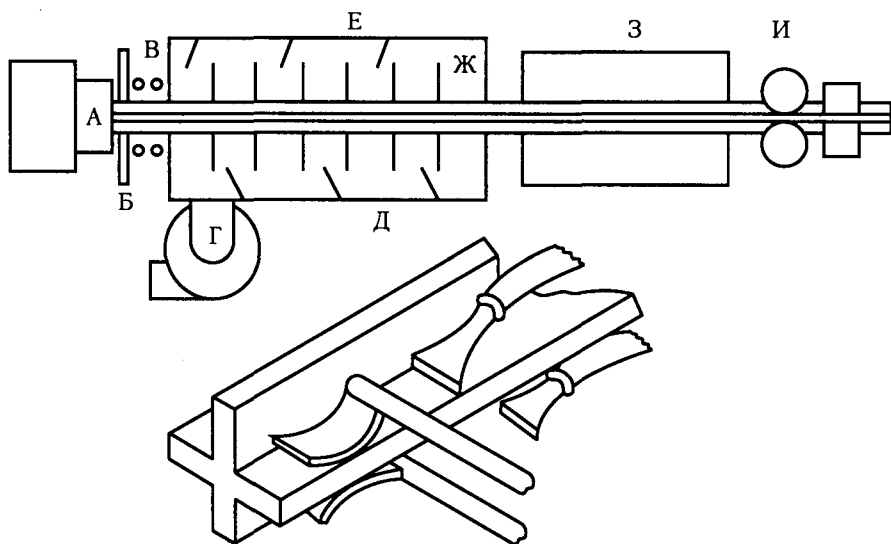


Рис. 7.3. Калибрование профилей из полиэтилена калибрующими пластинами: А — экструзионная головка; Б — асбестовая заслонка для предотвращения охлаждения головки; В — перфорированные трубки для предварительного охлаждения экструдата сжатым воздухом; Г — воздушная подушка; Д — закрытый воздушный желоб; Е — крышка; Ж — калибрующие пластины; З — дополнительная охлаждающая водяная ванна; И — тянущее устройство

Температура подаваемой на охлаждение воды контролируется и регулируется независимо для каждой форсунки для создания равномерного охлаждения профиля по периметру. Охлаждение профиля с помощью водяного душа должно производиться для уже затвердевшего с поверхности экструдата (ниже $T_{кр}$), чтобы предотвратить появление на профиле коробления, утяжин, скручивания некоторых участков из-за неравномерного охлаждения.

Небольшие профили простой формы высотой до 10 мм лучше охлаждать в открытой ванне или желобе. Воздушные кольца для калибрования и охлаждения изготавливают из медной трубы диаметром 8–12 мм, в которой с шагом 6–7 мм сверлят отверстия диаметром около 1 мм вдоль внутренней поверхности кольца. Форма «воздушных» колец подбирается в зависимости от конструкции профиля. Конструкция кольца должна обеспечивать равномерное охлаждение изделия.

Калибрование небольших тонкостенных сплошных профилей возможно также с помощью индивидуальных охлаждаемых водой калибрующих пластин (рис. 7.4), устанавливаемых в воздушном желобе с крышкой. Пластины изготавливают из теплопроводного материала (латуни или алюминия). Толщина неразъемных пластин 3–6 мм, разъемных — 10–15 мм. Профилирующее отверстие в пластинах должно иметь плавный вход без острых кромок и скругление на выходе.

Лучшие результаты при калибровании сплошных профилей дает установка калибрующих пластин в открытой водяной ванне. Крепление калибрующих пластин в воздушном желобе или водяной ванне может быть самым разнообразным. Чаще все-

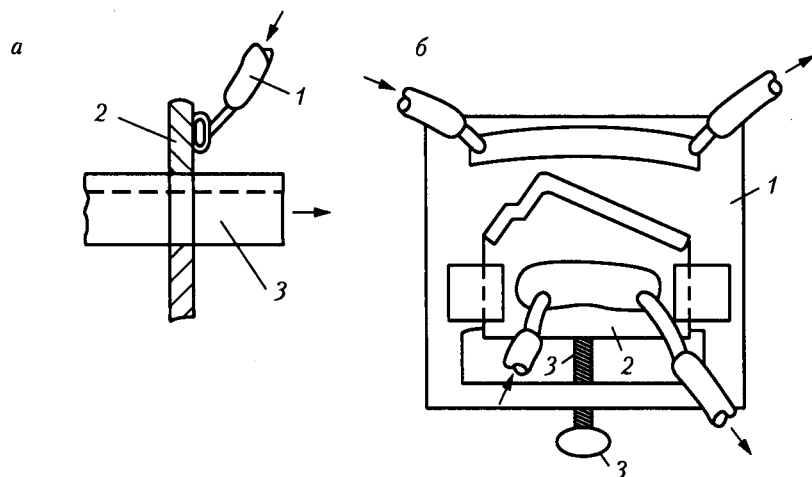


Рис. 7.4. Конструкция калибрующей пластины для калибрования профиля.

а: 1 — шланг для подвода охлаждающей жидкости; 2 — калибрующая пластина; 3 — калибруемый профиль;
б: 1 — корпус пластины, 2 — вставка; 3 — регулятор положения вставки 2

го их размещают на направляющих гладких колонках или в пазах боковых стенок охлаждающей ванны, что позволяет менять положение пластин при калибровании профиля. Фиксирование пластин на колонках производится с помощью упругих зажимов или винтов.

Калибрование полых профилей. При получении труб и трубообразных профилей применяют калибрование с помощью калибрующих втулок и пластин, устанавливаемых в водяной вакуумной ванне. Более сложные полые профили (например, камерного типа) целесообразно калибровать длинномерными калибраторами.

Поскольку линейная усадка ПЭ довольно высока (2,5–3,5%), размеры отверстий калибрующих устройств по длине должны уменьшаться на величину термической усадки, что создаст постоянный контакт экструдата с поверхностью калибратора и хорошее охлаждение; однако изготовление такие калибраторов сложнее и, кроме того, нет гарантии получения требуемых размеров профиля, так как трудно точно предсказать характер изменения усадки материала при охлаждении.

На величину усадки влияют наличие препятствий, подрезов и поднутрений в профиле; толщина участков изделия; скорость экструзии; температура расплава; температура хладагента; скорость циркуляции хладагента; теплофизические характеристики материала калибратора.

Калибрование и охлаждение ограничивает производительность технологической линии. При выборе способа калибрования и охлаждения следует ориентироваться на максимальную (пластикационную) производительность экструдера, а расчет длины калибрующих и охлаждающих устройств также выполнять по теоретически возможной производительности. Более подробно эти вопросы разобраны в главе 5.

Общие рекомендации по экструзии полиэтилена приведены в табл. 7.10 [37].

Таблица 7.10. Рекомендации по экструзии полиэтилена

	Экструзия ПЭВП	Экструзия ПЭНП
Экструдер	Одношнековый экструдер с вакуумной рифленой втулкой в зоне загрузки	Одношнековый экструдер с рифленой загрузочной втулкой и с вакуумной зоной дегазации
Конструкция шнека	Барьерный шнек длиной 25–30 D с двумя зонами смешения: диспергирующе-смесительный спиральный элемент для интенсивного сдвига, ромбовидная смеситель-но-распределительная секция	Барьерный шнек длиной 25–30 D с двумя зонами смешения: диспергирующе-смесительный спиральный элемент для интенсивного сдвига, ромбовидная смеситель-но-распределительная секция
Степень сжатия	3 : 1	3,5 : 1
Температура в цилиндре, °C	180–205	150–200
Температура расплава, °C	180–205	160–200
Подсушка	Не требуется, при переработке дробленого материала подсушить 3 ч при $T = 105\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$	Не требуется; для дробленых отходов — 3 ч при $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
Калибрование	См. раздел «калибрование профилей»	См. рекомендации выше
Прочие рекомендации	При переработке ПЭВП с бимодальным ММР требуется привод экструдера с более высоким (на 10–15%) крутящим моментом и более высокая температура расплава. При использовании шнеков большого диаметра рекомендуется использовать двухзаходные шнеки, обеспечивающие лучшее транспортирование материала в зоне загрузки	Введение процессинговых добавок повышает производительность оборудования на 10–20%. При использовании шнеков большого диаметра рекомендуется использовать двухзаходные шнеки, обеспечивающие лучшее транспортирование материала в зоне загрузки

7.2.2.2. Переработка полипропилена

Оборудование. Для производства полипропиленовых труб и профилей обычно используют одношнековые экструдеры без дегазации с рабочей длиной шнека 25...28 D .

Для переработки порошкообразного полипропилена могут быть использованы двухшнековые экструдеры для ПВХ, однако их производительность на полипропилене составляет всего лишь 35–50% от производительности на порошкообразном ПВХ [17, 27–29]. В некоторых случаях используют одношнековые экструдеры с дегазацией, что вызвано повышенной склонностью полимера к термоокислительной

Таблица 7.11. Длина зон в шнеках для экструзии труб из полипропилена [27–29]

Зона	Длина зоны в диаметрах при длине шнека	
	25D	30D
Зона загрузки, L_1	12,5	15
Зона сжатия, L_2	0,5	0,5
Зона гомогенизации, L_3	< 2,0	3,0
Зона декомпрессии, L_4	1,0	1,0
Зона подачи, L_5	8,5	10,0

Таблица 7.12. Глубина канала в зонах шнека для переработки полипропилена

Диаметр шнека D , мм	Зона загрузки h_1 , мм		Зона гомогенизации h_3 , мм		Зона подачи h_5 , мм	
	25D	30D	25D	30D	25D	30D
60	10	–	3,4	–	5,8	–
90	12	12,3	4,7	4,9	7,4	7,7
120	13,5	14,5	5,7	5,9	8,8	9,2
150	15,3	16,5	6,7	7,0	10,0	10,4
200	19,5	20,3	8,1	8,7	12,2	12,7

деструкции. Удаление летучих веществ, выделяющихся при деструкции, способствует повышению качества экструдированных изделий.

Шнеки. Оптимальным для переработки полипропилена является пятизонный декомпрессионный шнек. В табл. 7.11 и 7.12 приведены размеры шнеков для производства полипропиленовых труб. Шаг нарезки $t = D$, радиальный зазор между цилиндром и гребнем шнека $h = 0,01D$.

Смесительная зона представляет собой 2–3 гладких кольца длиной $2D$, расположенных после зоны декомпрессии. Старые конструкции шнеков с малым смесительным воздействием на материал, такие как шнек с прогрессивно убывающей глубиной нарезки или с короткой зоной сжатия, в настоящее время применяется редко.

Поскольку полипропилен при нагреве и интенсивном сдвиговом воздействии склонен к деполимеризации, необходимо ограничивать верхний предел скорости вращения шнека и достигаемую при этом скорость сдвига в зоне гомогенизации.

Полипропилен не поглощает влагу, но на поверхности холодных гранул может конденсироваться влага, поэтому материал перед подачей в экструдер рекомендуется подогреть и подсушить. Температура подсушки гранулята составляет 70–110 °С, это дает увеличение производительности экструдера при постоянной скорости вращения шнека до 30%. Чем выше производительность экструдера, тем лучше следует прогреть гранулят перед поступлением в канал шнека.

Для контроля температуры материала в горловине бункера экструдера устанавливают термодатчик, соединенный с показывающим или регистрирующим прибором. Хорошие результаты дает подсушка гранулята во взвешенном слое в токе горячего воздуха.

Экструзионные головки и калибрующие устройства. Для экструзии полипропиленовых труб и полых профилей используются такие же головки, как и для ПЭВП: головки, у которых дорнодержатель выполнен в виде крестовины с обтекаемыми спицами; головки с решетчатым дорнодержателем и двойным поворотом расплава (*Hoechst*, ФРГ) и головки со спиральным распределителем (*Reifenhauser*, ФРГ). Для производства труб малых размеров (до $\varnothing 110$ мм) чаще всего используется первая конструкция, для больших труб — вторая или третья.

Головки с крестообразным дорнодержателем. Ширина спиц дорнодержателя составляет 11–12 мм. На спицы дорнодержателя при течении расплава действуют большие силы среза (сила пропорциональна квадрату внутреннего диаметра трубы), поэтому количество спиц принимается из условия обеспечения допустимой прочности на срез.

Оптимальное соотношение диаметров дорнодержателя и дорна составляет 2:1 (для труб больших диаметров 1,5:1), угол наклона образующей дорна на коническом участке находится в диапазоне 8–12°.

Давление в головке при переработке полипропилена обычно составляет 180–300 атм.

Поскольку полипропилен обладает высокой эластичностью расплава, необходимо предусмотреть условия для релаксации расплава после прохождения спиц дорнодержателя и «залечивания» следов разделения потока. Для этого поперечное сечение канала в дорнодержателе принимают в 1,5–1,6 раза больше, чем в головках для экструзии ПВХ. Например, для трубы $\varnothing 125$ мм с толщиной стенки h диаметр дорнодержателя по дорну определяется по формуле $D_d = 1,65 \cdot (d_n - 2h)$, а величина зазора в дорнодержателе $B = fh$, где $f = 2,0\text{--}2,5$. Для трубы с толщиной стенки 5 мм диаметр дорнодержателя $D_d = 190$ мм, зазор $B = 10\text{--}12,5$ мм [37].

Естественно, для каждого типоразмера трубы не требуется изготавливать отдельный дорнодержатель. Головки для производства труб конструируют для диапазона размеров труб, в пределах которого основные детали (корпус, адаптер, дорнодержатель и пр.) имеют постоянные размеры, и только сменные формирующие детали (мундштуки и дорны) имеют свои размеры для каждого типоразмера.

Головки со спиральным распределителем. Для экструзии труб больших размеров из полиолефинов головки обычной конструкции слишком громоздки, поэтому была разработана головка специальной конструкции со спиральным распределителем. Головки подобной конструкции широко используются при производстве рукавной пленки.

Головки с решетчатым дорнодержателем и поворотом расплава. Головка такой конструкции запатентована фирмой *Hoechst*, ФРГ. В ней расплав после спиц дорнодержателя обычной конструкции поворачивается на 90° и проходит через кольцевую перфорированную решетку в формующий инструмент. Такая конструкция позволяет уменьшить влияние рассекателей потока на качество напорной трубы. Нормальное давление в головке составляет 60–160 бар. Поскольку в каналах головки выделение тепла в результате сдвига слоев расплава не очень велико, то с головками подобной конструкции экструдер может работать при максимальной производительности. Диаметр отверстий в кольцевой решетке составляет 1,2–2,5 мм. Диаметр дорна на выходе составляет 0,65–1,0% от диаметра наружной части решетки, поэтому головка такой конструкции меньше и легче головки со спиральным распределителем.

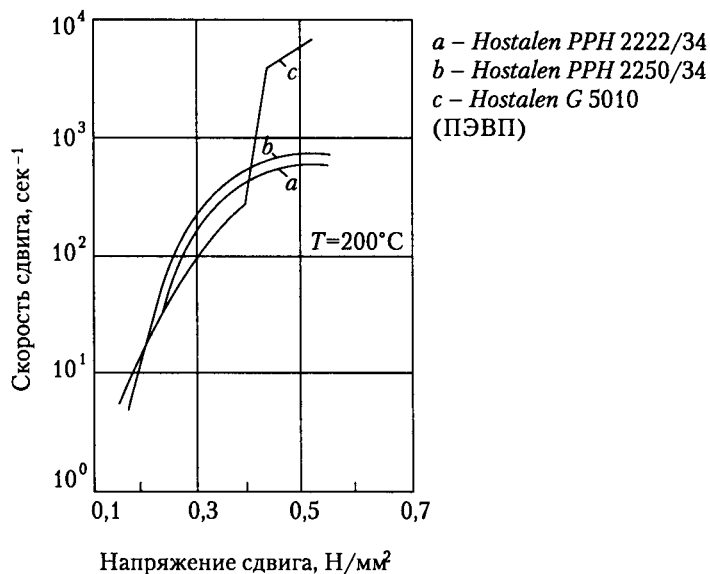


Рис. 7.5. Кривые течения для ПП (*a*, *b*) и ПЭВП (*c*)

ПЭВП и полипропилен значительно различаются по прочности расплава. Если ПЭВП не меняет прочность расплава в широком диапазоне температур, то для полипропилена характерно снижение этой величины с возрастанием температуры расплава. Прочность расплава связана с вязкостью при растяжении и его эластичностью. Приведенная на рис. 7.6 зависимость прочности расплава от температуры показывает, что трубы и трубообразные профили труднее получать из полипропилена, чем из ПЭВП, поэтому необходимо более тщательно контролировать параметры технологического процесса.

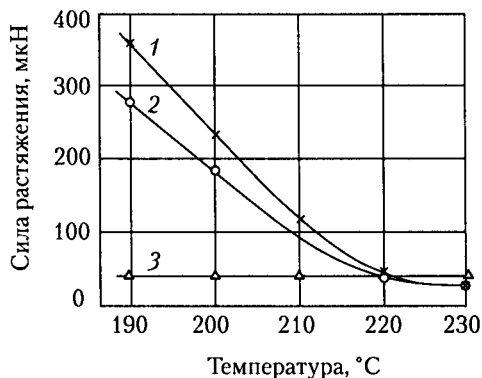


Рис. 7.6. Зависимость прочности расплава от температуры: 1 — Hostalen PPH 2222/34 (ПП); 2 — Hostalen PPH 2250/34 (ПП); 3 — Hostalen GM 5010 T2 (ПЭВП)

Теплопроводность полипропилена ниже, чем полиэтилена, поэтому время охлаждения при производстве погонажных изделий из полипропилена удлиняется. Формоустойчивость расплава полипропилена в силу этого ниже, так как сила тяжести действует на расплав более продолжительное время, чем на полиэтилен, в связи с чем возникают проблемы обеспечения равномерности толщины стенки для полипропилена.

7.2.3. Особенности переработки

7.2.3.1. Полиэтилен

Улучшение внешнего вида поверхности профиля. Поверхности калиброванного профиля можно улучшить путем кратковременного оплавления, пропуская профиль через нагревательный туннель, в котором установлены инфракрасные нагреватели. Степень нагрева поверхности профиля и прогрева его в целом следует контролировать и регулировать интенсивность теплового излучения. При недостаточном охлаждении внутренней поверхности профиля его повторный нагрев может деформировать форму изделия, и изделие пойдет в брак. Наиболее благоприятный вариант оплавления поверхности — профиль полностью остыл ниже $T_{кр}$, а нагрев поверхности происходит очень быстро и на малую глубину.

Улучшения качества поверхности профиля можно добиться также путем введения в материал специальных добавок [33, 34], создающих при течении расплава смазывающий слой на границе расплава и металла. Благодаря этому течению приближается

Основными особенностями материала, которые следует учитывать при экструзии профильных изделий, являются:

- высокая прочность расплава, что допускает большие вытяжки экструдата;
- широкий диапазон температур переработки;
- высокая эластичность расплава и зависимость ее от параметров технологического процесса, причем этот фактор ограничивает использование полиэтилена (особенно ПЭВП) для производства изделий сложной конфигурации;
- высокая кристалличность материала, требующая равномерного охлаждения экструдата при создании значительного удельного давления калибрования;
- значительная термическая усадка материала при охлаждении и склонность к накоплению остаточных напряжений;
- быстрое охлаждение расплава ПЭВП и сравнительно медленное — расплава ПЭНП определяет возможность формования относительно сложных изделий для ПЭНП и затруднено для ПЭВП.

Для уменьшения остаточных напряжений жесткие полиэтиленовые профили (ПЭВП) могут быть подвергнуты термообработке на оправке в воде при температуре 80–90 °С в течение 30 мин. Благодаря термообработке можно уменьшить продольную кривизну отрезков профилей до приемлемого уровня.

ЛПЭНП легко перерабатывается на том же оборудовании, что и ПЭНП и ПЭВП. Для некоторых марок ЛПЭНП необходимо правильно подобрать конструкцию шнека и режим охлаждения загрузочной зоны экструдера [18, 19]. При экструзии расплава ЛПЭНП меньше коробится, чем у ПЭНП и особенно ПЭВП, а стабильность размеров выше. Температура экструзии 170–200 °С, температуру воды, подаваемой в калибратор, лучше поддерживать на уровне 20–60 °С. Режим экструзии конкретных марок подбирается при наладке технологического процесса.

Чистка оборудования и оснастки. Чистка шнека и оснастки возможна с помощью загрузки в экструдер смеси-консерванта на основе ПВХ. Высоковязкая смесь удаляет прилипший расплав к шнеку, цилиндру, деталям головки. После «прогонки» консерванта не представляет труда вынуть и механически почистить шнек и детали головки. Прогонку консерванта следует производить при температуре 160–170 °С, оставлять консервант в головке не рекомендуется, так как удалить его можно только более вязким расплавом, для чего потребуется много времени и материала. Механическая чистка деталей от консерванта при температуре 100–150 °С затруднений не вызывает. Если детали головки, особенно фильеры, выполнены неразъемными и имеют малые формующие зазоры, необходимо позаботиться о подходящем инструменте для чистки. Это тонкие упругие пластины или стержни со скругленными краями и имеющие нужную ширину или диаметр, поскольку понадобится целый набор таких пластин для чистки каналов различных размеров.

Большие и тяжелые головки отжигают в печах во взвешенном слое окиси алюминия при температуре до 400–500 °С. Остатки материала в головке частично сгорают, после чего необходима механическая чистка остатков и полировка деталей.

Фирма *Rolf Schlicht GmbH*, ФРГ, выпускает специальный гранулят для удаления остатков термопластов из экструзионных головок [38]. Гранулят состоит из ПЭВП

пропитанного концентрированным раствором нейтральной неорганической соли. Он не пылит и после изготовления без осложнений хранится на складе. При прохождении через оборудование соль переводит остатки термопластов в низковязкое состояние, и они легко соединяются с ПЭ. Такой способ предпочтителен, так как не требует демонтажа и нового монтажа головки, поэтому очищенную таким способом головку можно целиком хранить до следующей установки на экструдер. Предлагаются и другие средства для чистки оснастки, например, фильерная паста ООО «Полимер-Проект ХХI» [39], назначение которой аналогично. Выбор метода чистки оборудования и оснастки зависит от многих причин и определяется конкретными условиями производства.

7.2.3.2. Переработка ВМПЭ

Основным методом переработки ВМПЭ в погонажные изделия является плунжерная экструзия, на долю которой приходится примерно 35% общего объема переработки ВМПЭ. С помощью этого метода получают полуфабрикаты типа простых профилей, труб, стержней, прутков. В плунжерных экструдерах полиэтиленовый порошок сжимается до образования уплотненной массы, которая в последней обогреваемой зоне цилиндра пластицируется под высоким давлением. Температура переработки составляет 180–200 °С.

Широкому применению ВМПЭ препятствует трудность его переработки вследствие высокой вязкости расплава. Материал не плавится при температуре выше точки плавления его кристаллической фазы (136 °С), а только переходит в вязкоэластичное состояние.

7.2.3.3. Полипропилен

Для производства труб и профилей применяют высокомолекулярные марки полипропилена с насыпной плотностью гранулята 0,51–0,57.

По сечению канала на входе в головку может наблюдаться перепад температур в 12–15 °С, причем более высокие температуры наблюдаются в средней части потока. Радиальные колебания температуры в 5–9 °С обычны для больших экструдеров.

Изделия малых размеров можно экструдировать при более высоких температурах расплава, нежели крупногабаритные. Например, трубу $\varnothing 63 \times 5,8$ экструдировать при температуре расплава 240 °С, тогда как трубу $\varnothing 450 \times 41$ мм рекомендуется экструдировать при температуре всего в 210 °С, в противном случае трудно обеспечить одинаковую толщину стенки трубы из-за действия силы тяжести и малой вязкости при высокой температуре. Оптимальное качество поверхности трубы получается при температурах 210–220 °С. Изменение температуры в обе стороны ухудшает качество поверхности.

Для декомпрессионного шнека температура загрузочной зоны составляет 170 °С, в последующих зонах — 205 °С. В смесительной зоне температура расплава возрастает примерно на 20 °С.

При пневмокалибровании давление раздува составляет 0,6–1,6 атм для труб небольших размеров и 0,35–0,80 атм для больших.

Вследствие более низкой теплопроводности путь охлаждения ПП-труб больше, чем для полиэтиленовых. Например, при температуре на внутренней стенке 120 °С

длина пути охлаждения трубы $\varnothing 160 \times 22,1$ мм при производительности 185 кг/час и скорости отвода трубы 0,24 м/мин составляет 12 м. При равной производительности путь охлаждения трубы или профиля из полипропилена примерно на 40% больше, чем для аналогичных изделий из полиэтилена.

Производительность экструдера при переработке полипропилена на 15–18% ниже, чем для ПЭВП.

7.3. Стирольные пластики

7.3.1. Ударопрочный полистирол

Ударопрочный полистирол представляет собой продукт сополимеризации стирола с каучуком. В зависимости от назначения ударопрочный полистирол, выпускаемый в соответствии с ГОСТом 28250-89 «Полистирол ударопрочный. Технические условия», имеет 4 группы марок, различающихся по величине ударной вязкости: полистирол сверхударопрочный, высокой, средней и низкой ударопрочности.

Ударопрочный полистирол выпускается термо- или светостабилизированным в виде однородных неокрашенных или окрашенных гранул размером 2–5 мм. Для производства экструзионных изделий технического назначения рекомендуется использовать высоковязкие марки: УПМ-0503, УПМ-0508, УПС-0803Э, УПМ-0703Э, УПС-0801. Новые марки УПС-800ФМ, УПС-825Д, УПС-825Е, УПС-825ТТ с повышенной стойкостью к образованию трещин, стойкостью к низким температурам, трудногорючие выпускаются по ТУ 2214-001-49510617-99, ТУ 2214-009-00203521-94.

Индексы М и С после букв УП, обозначающих ударопрочный полистирол, характеризуют метод его получения: М — полимеризация в массе; С — блочно-суспензионная полимеризация. Индексы Л и Э обозначают рекомендуемые способы переработки данного материала: литьем под давлением или экструзией соответственно.

Регламентируемые показатели ударопрочного полистирола по ГОСТ включают массовую долю остаточного мономера, допустимую влажность, механические показатели (прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, ударную вязкость по Шарпи на образцах с надрезом), технологические характеристики (ПТР при $T = 200^\circ\text{C}$, $P = 5$ кгс и разброс показателя в пределах партии). Общие справочные показатели материала приведены в табл. 7.13.

Из-за невысокой по сравнению с НПВХ и АБС-пластиками прочности на удар, низкой атмосферостойкости и повышенной горючести ударопрочный полистирол в настоящее время редко применяется для производства профильных изделий. Свойства и особенности переработки ударопрочного полистирола подробно рассмотрены в [40–42].

7.3.2. АБС-пластики

АБС-пластик является продуктом привитой сополимеризации акрилонитрила, бутадиена и стирола. Материал обладает высокой прочностью на удар и жесткостью, хорошей работоспособностью при низких и повышенных температурах, хорошим сопротивлением к истиранию, высокой химической стойкостью, хорошими диэлектри-

Таблица 7.13. Справочные показатели ударопрочного полистирола

Показатели	УПС	УПМ
Плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-3} (\text{г/см}^3)$	1,04–1,06	1,04–1,06
Предел прочности при изгибе, МПа	45–60	35–50
Модуль упругости при изгибе, МПа	2500	2000
Твердость по Роквеллу (шкала R)	115	105
Твердость по Бринеллю, МПа (кгс/см^2)	120–150	120–150
Температура тепловой деформации под нагрузкой 1,85 МПа, °C	75–80	75–80
Влагопоглощение за 24 ч при 20 °C, %	0,05	0,05
Удельное электрическое сопротивление, Ом · м	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц	$4 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4}$
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц	2,6–2,7	2,6–2,7
Литьевая усадка, %	0,4–1,0	0,4–1,2
Температура размягчения по Вика в жидкой среде, °C	85	75
Ударная вязкость на образцах без надреза, кДж/м^2	60	55
Ударная вязкость на образцах с надрезом, кДж/м^2 : при –20 °C при –40 °C	Снижение на 30–40% Снижение на 50%	

ческими свойствами. Температура применения материала от –40 до +80 °C, временно — до 100 °C [44].

АБС относится к непрозрачным пластмассам, хорошо окрашивается в различные цвета. Изделия из обычных марок АБС имеют высокий поверхностный глянец, выпускаются также специальные матовые сорта АБС.

В России АБС-пластики производят Узловское ОАО «Пластик» (Тульская обл.) и ПО «Салаватнефтеоргсинтез» (Башкирия) [6].

К экструзионным маркам относятся АБС 1106-30, АБС 2802-30, АБС 1010-30, АБС 1010-31 [45]. Неплохо перерабатываются экструзией и переходные марки АБС 2020-30, 31, 32.

Обозначение пластика АБС состоит из наименования марки, буквенных обозначений, номера рецептуры окраски, указания цвета материала, сорта и обозначения ТУ.

Буквенное обозначение, стоящее после числового, указывает на преимущественный метод переработки, основное назначение или наличие специальных добавок: Э — марка, предназначенная для переработки методом экструзии; К — марка, предназначенная для компаундирования с ПВХ; Т — марка с повышенной теплостойкостью; С — марка со светостабилизирующей добавкой.

Все марки пластиков АБС выпускают термостабилизированными. По требованию потребителя пластики АБС могут выпускаться и светостабилизированными.

В табл. 7.14 приведены основные справочные характеристики АБС-пластиков.

Зарубежные экструзионные марки АБС представляют фирмы *Dow Chemical* (США), *BASF*, *Bayer* (ФРГ), *General Electric* (Бельгия), *EniChem* (Италия), *Kumho*, *Chi Ime*, *LG* (Южная Корея) и др. [46, 47].

Таблица 7.14. Справочные характеристики АБС-пластиков

Характеристика	Величина
Плотность, г/см ³	1,02–1,05
Теплостойкость по Вика, °С	94–97
Коэффициент теплового линейного расширения, $1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$	8–10
Усадка при литье под давлением, %	0,3–0,7
Твердость по Роквеллу (шкала R)	95–123
Твердость по Бринеллю при 20 °С, кгс/мм ²	9,4–15,6
Модуль упругости при статическом изгибе, кгс/см ²	$15 \cdot 10^3$ – $24 \cdot 10^3$
Ударная вязкость по Изоду, кДж/м ²	11–35
Водопоглощение за 24 ч при 20 °С, %	0,2–0,3
Светостойкость окраски	(1)
Термостойкость окраски	(2)
Теплопроводность, Вт/(м · °С)	0,214
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · °С)	1,34–2,30

Примечания.

(1) Окрашенный материал не изменяет цвета при облучении лампой ПРК-2 в течение 100 ч при температуре 50 °С на расстоянии 300 мм до источника света.

(2) Материал не изменяет цвета при выдержке при $T = 230 \text{ } ^\circ\text{C}$ в течение 20 мин.

АБС-пластики обладают повышенной стойкостью к ползучести. Так, при комнатной температуре модуль упругости при действии напряжения 7 МПа в течение 1000 ч изменяется не более чем в 2 раза. При более высоких температурах и уровнях напряжений, особенно выше 65 °С и 14 МПа, снижение механических показателей может быть значительным и превышать 50% [48].

7.3.2.1. Влияние на свойства воздействия окружающей среды

В обычных условиях (при нормальной температуре и влажности) атмосферные факторы не оказывают заметного воздействия на свойства АБС-пластиков. Однако при повышенных температурах, влажности, резкой смене температур, при воздействии солнечного света детали из АБС требуют определенной защиты, так как при этих условиях изменяются механические показатели материала и портится внешний вид изделий: прежде всего снижается глянец деталей и происходит изменение цвета (белые сорта желтеют). В некоторых случаях возможно даже растрескивание деталей или значительная потеря прочности. Для улучшения погодостойкости изделий из АБС-пластиков их дублируют поливинилхлоридной или окрашенной полиакрилатной пленкой. Однако дублирование снижает прочность на удар, особенно при низких температурах. Окрашенные марки АБС несколько лучше сопротивляются воздействию окружающей среды, наиболее стойкими являются черные композиции.

Хорошие результаты по защите АБС от УФ-излучения и влияния атмосферных факторов дает покрытие поверхности изделия тонким слоем ПММА в процессе со-

экструзии, хотя это удорожает выпуск продукции. Такой метод широко применяется при производстве листовых материалов.

Нижний слой из АБС обеспечивает листам качественное термоформование, высокую ударпрочность и устойчивость к низким температурам. Слой акрила защищает АБС от УФ-лучей, обеспечивает великолепное качество поверхности с сильным блеском, повышенную химическую стойкость. Материал устойчив к воздействию любых факторов внешней среды: после длительной эксплуатации комбинированных изделий цвет материала практически не меняется. Акриловый слой защищает также поверхность листа от царапин.

7.3.2.2. Экструзия АБС-пластиков

Материал легко перерабатывается экструзией в широком диапазоне текучести расплава полимера. Поэтому экструзией можно удовлетворительно перерабатывать марки, которые относятся к литьевым. Например, переходная марка АБС 2020-30 (или 32) вполне пригодна для производства простых по форме трубообразных и сплошных профилей. Для изделий более сложной формы лучше использовать более вязкие и формоустойчивые марки.

Подсушка материала. Большое влияние на внешний вид экструдированных профилей оказывает качество предварительной подготовки сырья. Хотя АБС-пластики не являются сильно гигроскопичными материалами, но при хранении на поверхности гранулированного материала конденсируется влага. Процесс особенно интенсифицируется, когда холодный гранулят со склада доставляется в производственное помещение с теплым влажным воздухом. Обычно гранулы АБС-пластика содержат 0,3–0,4% влаги. При экструзии влажность сырья является причиной образования в изделиях раковин, пустот, шероховатости поверхности и значительного снижения прочности. Для получения качественных профильных изделий влажность материала не должна превышать 0,05–0,09% [44, 48]. В целях устранения повышенной влажности гранулят перед переработкой необходимо подсушивать. Оптимальным считается режим сушки гранул при температуре 80 °С в течение 3 ч. В бункерных сушилках с продувом горячего воздуха через толщу материала для сушки достаточно 2 ч. При температуре выше 80 °С наблюдается слипание гранул, особенно вблизи металлических поверхностей, что недопустимо, так как комки гранул могут перекрыть питающее отверстие экструдера и вызвать нарушение технологического процесса.

При хранении подсушенного материала в закрытых полиэтиленовых мешках влага обычно не обнаруживается в течение 4–5 ч. Если после сушки остаточная влага достаточно велика, то на внутренней поверхности мешка обнаруживаются капельки влаги в виде тумана.

Следует иметь в виду, что при длительной сушке изменяется текучесть расплава материала [49]. Так, ПТР гранул АБС-пластика при сушке в течение 3 ч при 70 °С снижается на 10%, в течение 5 ч — на 30%, таким образом, длительная сушка отрицательно влияет на технологические свойства материала.

Оборудование. АБС можно экструдировать на любых стандартных экструдерах для переработки пластмасс. Из-за высокой вязкости расплава для переработки различ-

Таблица 7.15. Размеры шнеков для экструзии АБС-пластиков [50, 51]

Диаметр шнека D , мм	63,5	88,9	114,2
Глубина канала h , мм:			
в дозирующей зоне	4,5–6,5	6,5–8,2	7–9,7
в зоне загрузки	9–14,3	12,7–17,5	13,7–19,3
Длина зоны загрузки, диаметров	5	5	5
Длина зоны сжатия, диаметров	10	10	10
Длина дозирующей зоны, диаметров	5	5	5

ных марок АБС требуются машины с повышенной мощностью привода (на 25% выше, чем для переработки ударопрочного полистирола). Предпочтительны экструдеры с длиной шнека 20:1, 24:1 или 30:1, поскольку такие шнеки обеспечивают более равномерное распределение температур в расплаве и хорошее перемешивание материала. Экструдеры целесообразно оснащать бункерами с подогревом материала. При применении экструдеров с дегазацией обеспечивается более высокое качество продукта благодаря удалению летучих веществ при переработке и устраняется необходимость подсушки материала.

Шнек экструдера — однозаходный, с постоянным шагом и прогрессивно уменьшающейся глубиной нарезки. Степень сжатия 2:1–2,5:1. АБС-пластики — высоковязкий материал, поэтому шнеки для его переработки должны иметь более глубокие каналы, чем каналы шнеков для ударопрочного полистирола. Шнеки с мелкими каналами улучшают смешение материала, но сдвиговое воздействие значительно повышает температуру расплава, что может оказать неблагоприятное воздействие на качество изделия и стабильность технологического режима переработки.

В табл. 7.15 приведены размеры шнеков длиной 20 D .

Улучшение смесительного воздействия достигается в шнеках с зонами интенсивного воздействия на материал. На рис. 7.7 показаны возможные варианты смесительных секций шнека одношнекового экструдера.

Технологическая оснастка. Для производства профильных изделий используются прямоточные головки. Для предотвращения разложения материала следует избегать застойных зон в головке. Разбухание АБС-пластиков невелико и составляет по площади поперечного сечения 1,2–1,4.

Длина формующей части фильеры обычно принимается равной 20–30 зазорам; величину зазора ориентировочно принимают равной толщине стенки профиля. Детали головки, соприкасающиеся с расплавом, хромируют и полируют.

Калибрование профилей, как правило, осуществляется с помощью длинномерных вакуумных устройств, либо коротких пластин или втулок, установленных в вакуумной ванне. Материал быстро приобретает жесткость при охлаждении, поэтому при «запуске» профиля достаточно охладить экструдат в короткой вакуумной охлаждаемой втулке, чтобы профиль приобрел товарный внешний вид, после чего постепенно устанавливают рабочую скорость экструзии, синхронизируя подачу материала шнеком и отвод изделия тянущим устройством.

Особенности переработки. Основными технологическими факторами, влияющими на качество погонажных профильных изделий и производительность агрегата, являются температурный режим по зонам цилиндра и головки экструдера, частота вращения шнека, давление в головке, скорость отвода профиля, степень вытяжки экструдата, режим калибрования и охлаждения изделия.

Температурный режим переработки определяется вязкостью материала. По сравнению с ударпрочным полистиролом вязкость АБС-пластиков выше, поэтому температуры по зонам цилиндра и головки также устанавливают несколько выше. Так, температура по зонам цилиндра в направлении от загрузочной воронки к головке обычно принимается в диапазоне 180–220 °С, а температура головки — 200–210 °С.

При переработке АБС-пластиков не всегда удается полностью использовать максимальную производительность экструдера. Повышение частоты вращения шнека до верхнего предела может ограничивать недостаточная мощность приводного двигателя, перегрев расплава в результате механического разогрева, возникновение нестабильной работы экструдера (пульсация производительности).

Хорошее качество экструдата на выходе из головки достигается при сравнительно высоком давлении в головке. Обычно давление в 10–20 МПа достаточно для экструзии большинства профильных изделий.

Давление в головке при заданной геометрии фильеры регулируется с помощью изменения скорости вращения шнека, изменения температуры, подбором оптималь-

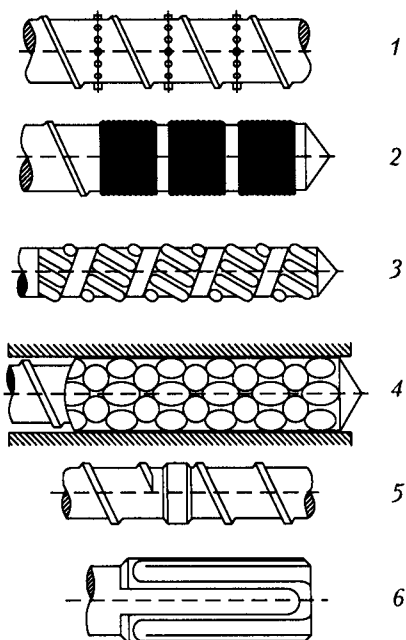


Рис. 7.7. Варианты смесительно-диспергирующих элементов шнеков для переработки АБС [52]:

1 — стержневая смесительная секция; 2 — смесительная секция *Dulmage*; 3 — смесительная секция *Saxton*; 4 — СТМ-секция; 5 — смесительная секция в виде кольцевого выступа; 6 — секция смешения *Union Carbide*

ной геометрии шнека, установкой на входе в головку решетки с пакетом фильтрующих сит. Установка фильтрующих решеток и сит целесообразна при изготовлении толстостенных изделий на головках низкого сопротивления [50, 51].

Число сеток при переработке АБС принимают от 2 до 6 при количестве отверстий на 1 см^2 равном 40–180. При недостаточно высоком давлении в головке уменьшается производительность экструдера, ухудшается гомогенизация расплава, может возникнуть неравномерность течения, особенно в местах фильеры, значительно удаленных от оси экструзии. При слишком высоком давлении может наблюдаться чрезмерное повышение температуры расплава и уменьшение формоустойчивости экструдата. Возрастает также нагрузка на двигатель привода.

Охлаждение изделий при экструзии. При экструзии профилей, особенно разнотолщинных, требуется обеспечить равномерное охлаждение изделия, иначе возникают термические напряжения, вызывающие коробление изделия, отклонение от прямолинейности, скручивание. Температура воды в охлаждающей ванне должна быть, по возможности, регулируема, чтобы температура поверхности изделия на выходе из ванны составляла 70–80 °C [50]. Температуру калибрующего устройства рекомендуется поддерживать на уровне 80–90 °C [51]. Минимальные остаточные напряжения при экструзии труб и трубообразных профилей достигаются при использовании двухсекционных ванн. В первой секции длиной 1–1,25 м поддерживают температуру воды 40–50 °C. Для снижения остаточных напряжений и последующей усадки при прогреве трубы или профиля рекомендуется степень вытяжки принимать не более 1,10–1,15.

Термический отжиг. Неравномерное охлаждение при калибровании приводит к искривлению профиля. Часто затруднительно подобрать условия, при которых искривление по длине находится в допустимых пределах. В таких случаях «сабельность» приходится устранять термообработкой. В некоторых случаях дифференциальный нагрев–охлаждение участков профиля может устранить проблему еще в линии. При невозможности обеспечить приемлемую прямолинейность изделия используют термический отжиг готовых профилей, для чего прямолинейные отрезки профилей плотно упаковывают в шпунт или другую тару с плохой теплопроводностью и погружают в горячую воду (65–75 °C) на 30–60 мин, после чего медленно охлаждают.

Возможен также отжиг в воздушной печи в течение 2–3 ч. При отжиге необходимо обеспечить относительно свободное перемещение профилей по длине и по возможности ограничить поперечное перемещение.

Основная трудность в проведении термообработки — найти подходящую по длине ванну или печь.

7.4. Полиакрилаты

Акриловые полимеры широко используются в различных отраслях промышленности и в быту. Под названием «акриловые полимеры» объединяются производные акриловой кислоты (акрилаты), метакриловой кислоты и их сополимеры.

Мировое производство полиакрилатов достигло широкого масштаба, что объясняется их замечательными оптическими свойствами, повышенной атмосферостойкостью, твердостью, прочностью на удар, устойчивостью к бензинам и маслам и другими качествами, по которым они превосходят такие пластмассы, как полистирол, поливинилхлорид, ацетат целлюлозы и др. Особенно высокими физико-механическими характеристиками обладает полиметилметакрилат, получивший широкое распространение. Акриловые и метакриловые полимеры легко окрашиваются во всевозможные цвета.

7.4.1. Свойства

Для производства изделий методом шнековой экструзии используют суспензионный полиметилметакрилат [53–58], поставляемый в виде бисера или гранул.

Полиметилметакрилат (ПММА) поставляется фирмами-изготовителями под различными торговыми названиями. В табл. 7.16 приведены торговые названия ПММА и фирмы-производители материала. В России ПММА производят Дзержинское ПО «Оргстекло» и Челябинский ЗОС [6].

Промышленностью различных стран производится три типа метакрилатных суспензионных полимеров, различающихся по теплостойкости и текучести. Наиболее теплостойкие материалы обладают сравнительно плохой текучестью и идут чаще всего на изготовление технических изделий, работающих при значительных термических нагрузках. Полимеры с наименьшей термической устойчивостью отличаются, наоборот, высокой текучестью, позволяющей изготавливать из них изделия геометрически сложных форм или применять их там, где хорошая текучесть материала в пластическом состоянии особенно важна. Полимеры со средней теплостойкостью преимущественно перерабатываются в изделия широкого потребления. Например, в ФРГ производится четыре типа полиметакрилатов, применяемых для литья под давлением и экструзии [6, 57]:

Таблица 7.16. Торговые названия полиметилметакрилата

Название	Фирма-производитель	Страна
<i>Altulite</i>	<i>Altulor S. A.</i>	Франция
<i>Degalan</i>	<i>Degussa</i>	ФРГ
<i>Diakon</i>	<i>ICI</i>	Англия
<i>Lucite</i>	<i>DuPont</i>	США
<i>Oroglas</i>	<i>Lenning Chemical</i>	Англия
<i>Perspex</i>	<i>ICI</i>	Англия
<i>Plexidur (AMMA*)</i>	<i>Rohn GmbH</i>	ФРГ
<i>Plexiglas</i>	<i>Rohn GmbH</i>	ФРГ
<i>Piesarit</i>	<i>Rohn GmbH</i>	ФРГ
<i>Sadur (AMMA*)</i>	<i>Rohn GmbH</i>	ФРГ
<i>Vedril</i>	<i>Monteshall</i>	Италия

*Сополимер с акрилонитрилом.

- тип 525 и тип 526 наиболее легко перерабатываются;
- тип 527 — наиболее широко используемый тип ПММА;
- тип 528 — теплостойкий ПММА.

Разделение на типы производится в зависимости от теплостойкости по Вика (при нагрузке 5 кгс) и сопротивления изгибу. В табл. 7.17 приводятся характеристики типов ПММА по *DIN 7745*. Механические свойства полиакрилатов значительно зависят от типа полимера, температуры и скорости нагружения. В табл. 7.18 приведены свойства основных типов ПММА. С увеличением температуры испытания прочность полимера значительно падает. В диапазоне температур 20–100 °С прочность на разрыв почти линейно снижается примерно в 3,5 раза [53, 57].

Для переработки и эксплуатации материала важны его теплофизические свойства, которые представлены в табл. 7.19.

Полиметилметакрилат обладает высоким светопропусканием (92% для длин волн в диапазоне 380–720 мкм). Акрилометилметакрилат (АММА) имеет светопропускание до 85%.

Переработка. Полиметилметакрилаты относятся к гигроскопичным материалам и перед переработкой требуют обязательной подсушки. В зависимости от типа ПММА температура подсушки колеблется от 70 до 100 °С, а время подсушки в полочных сушилках составляет 4–6 ч; при сушке в токе горячего воздуха время сушки сокращается до 2 ч.

Для экструзии ПММА целесообразно использовать одношнековые экструдеры с зоной дегазации и пятизонные шнеки с зоной декомпрессии. Длина пятизонных шнеков обычно составляет 25...28*D*. В этом случае подсушка материала необязательна. При использовании более коротких шнеков предпочтительны трехзонные шнеки с короткой зоной сжатия и степенью сжатия 3:1. Такие шнеки имеют постоянную глубину нарезки в зонах загрузки и дозирования и резкое изменение глубины на длине в 0,5 витка в зоне сжатия [55, 59, 61, 62]. Размеры шнеков приведены в табл. 7.20.

Акрилатные полимеры обладают высокой вязкостью и адгезией к металлу, поэтому для их переработки должны быть использованы экструдеры с повышенной мощностью привода. Если для переработки полиэтилена достаточно 1,14 кгм/с на каждые 45 кг/ч производительности, то для ПММА затрачиваемая мощность вдвое больше: не менее 2,28 кгм/с на каждые 45 кг/ч производительности. Характеристика привода экструдера должна быть жесткой и не зависеть от нагрузки в широком диапазоне частоты вращения шнека, причем особенно важно, чтобы привод передавал высокий крутящий момент при малых скоростях вращения шнека.

Для переработки ПММА чаще всего используют головки обтекаемого типа, так как застойные зоны вызывают постепенное разложение материала и резкое ухудше-

Таблица 7.17. Характеристики типов ПММА [57]

Характеристика	Тип 525	Тип 526	Тип 527	Тип 528
Сопротивление изгибу, Н/мм ²	1000	1050	1100	1150
Теплостойкость по Вика при нагрузке 5 кгс, °С	≥ 80	≥ 90	≥ 100	≥ 110

Таблица 7.18. Механические свойства ПММА и АММА*

Характеристика	Метод испытания	Высокомоле- кулярный ПММА	АММА	ПММА типа			
				525	526	527	528
Плотность, г/см ³	DIN 53479	1,18	1,17	1,18	1,18	1,18	1,18
Вид поставки	—	Полуфабрикат		Гранулы	Гранулы	Гранулы	Гранулы
Прочность при растяжении, Н/мм ²	DIN 53455						
при -40° С		110	155	—	—	—	—
23 °С		80	90	68	70	74	76
70 °С		40	35	—	—	—	—
Относительное удлинение, %	DIN 53455	4-5	80	2,5	3-4	3,5-4,5	3,5-4
Модуль высокоэластичности при растяжении, Н/мм ²	DIN 53457	3300	4800	3300	3300	3300	3300
Модуль сдвига <i>G</i> при 10 Гц, Н/мм ²	DIN 53445	1700	1900	1700	1700	1700	1700
Прочность на изгиб, Н/мм ²	DIN 53452	120	160	100	110	125	130
Прочность на сжатие, Н/мм ²	DIN 53454	140	140	120	125	130	135
Прочность на удар по Шар- пи, кДж/м ²	DIN 53453						
при 20 °С		12	50-60	18	18-22	18-22	18-22
-60 °С		10	30	—	—	—	—
с надрезом		2	4	2	2	2	2
Твердость, Н/мм ²	DIN 53456	200	220	170	180	190	200
Твердость по Роквеллу <i>H_R</i> , шкала <i>R</i>	ASTM D785	—	—	M84	M89	M93	M97
Коэффициент трения	—						
ПММА по ПММА		0,80	0,80	—	—	—	—
ПММА по стали		0,54	0,54	—	—	—	—

Таблица 7.19. Термические характеристики ПММА

Характеристика	Метод испытания	Высокомолеку- лярный ПММА	АММА	ПММА типа			
				525	526	527	528
Температура стеклования, °C	—	105	—	105	105	105	105
Верхняя температура применения (без нагрузки), °C	—	100	75	65	75	85	95
Теплостойкость по Вика (на воздухе) при нагрузке 50 Н	DIN 53460	120–125	94	85	95	105	115
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	—	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47
Коэффициент линейного тер- мического расширения, $K^{-1} \cdot 10^{-4}$	—	0,70	0,65	0,70	0,70	0,70	0,70
Теплопроводность, Вт/(м · К)	—	0,18	0,22	0,18	0,18	0,18	0,18
Температура воспламенения, °C	—	350	350	350	350	350	350
Горючесть	Горят хорошо, но в открытом пламени их можно зажечь только в тонком слое, скорость го- рения низкая. После прекращения горения полимер не тлеет						

Таблица 7.20. Размеры трехзонных шнеков для переработки ПММА

Диаметр шнека D , мм	38	50	63	90
Глубина нарезки в зоне дозирования h_2 , мм	2,1	2,6	3,2	4,3
Глубина нарезки в зоне загрузки h_1 , мм	6,4	7,9	9,5	12,7

ние прозрачности и механических характеристик изделия. Все рабочие каналы должны быть тщательно отполированы и иметь высокую поверхностную твердость.

Для получения качественных изделий из ПММА необходимо точное поддержание заданного температурного режима по зонам цилиндра и головки, а для получения высокого поверхностного глянца экструдата температура на выходе из головки часто поддерживается более высокой, чем в других зонах, поэтому головка должна иметь не менее двух независимо регулируемых тепловых зон. Желательно также контролировать температуру и давление расплава в головке и нагрузку на двигатель. Это позволит быстрее наладить технологический процесс и уменьшит опасность перегрузки двигателя. Давление в головке при переработке ПММА обычно составляет $100\text{--}150\text{ кгс/см}^2$ при получении изделий средних размеров. Длина формирующего участка в головке принимается не менее 12 зазоров.

Вязкость ПММА существенно зависит от температуры (рис. 7.8), поэтому важно поддерживать правильный температурный режим по зонам цилиндра и головки экструдера. Вместе с тем ПММА имеет высокую адгезию к металлу в широком диапазоне температур (рис. 7.9). Это затрудняет переработку материала и очистку деталей от расплава. Кроме того, это накладывает особые требования на конструкцию калибрующих устройств. При калибровании изделий из ПММА необходимо поддерживать минимальный контакт между экструдатом и поверхностью калибратора, поэтому калибрующие пластины или короткие вакуумные втулки, установленные в водяной ванне, предпочтительны по сравнению с длинномерными калибрами.

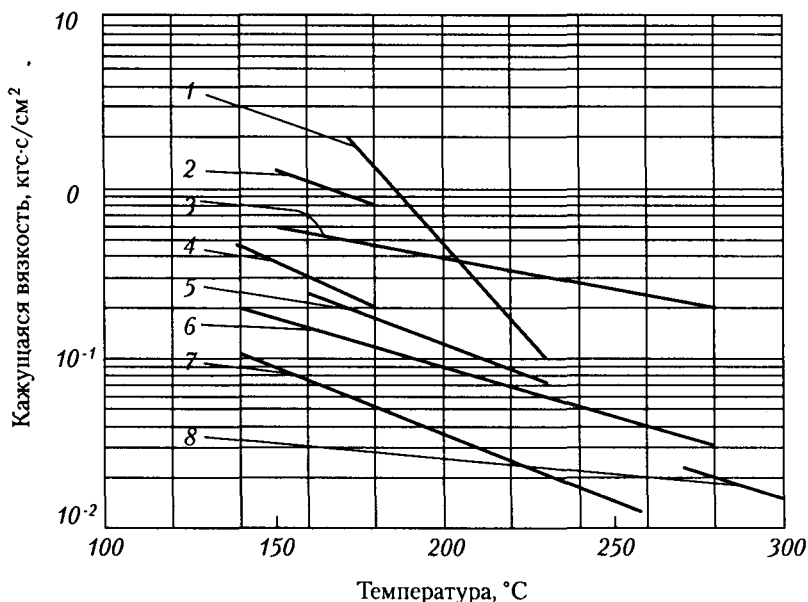


Рис. 7.8. Зависимость вязкости расплавов некоторых полимеров от температуры [55]:
 1 — ПММА; 2 — НПВХ; 3 — ПЭ (ПТР = 0,3 г/10 мин); 4 — пластифицированный ПВХ; 5 — УПС; 6 — ПЭ (ПТР = 1,2); 7 — ПЭ (ПТР = 20,0); 8 — ПА66

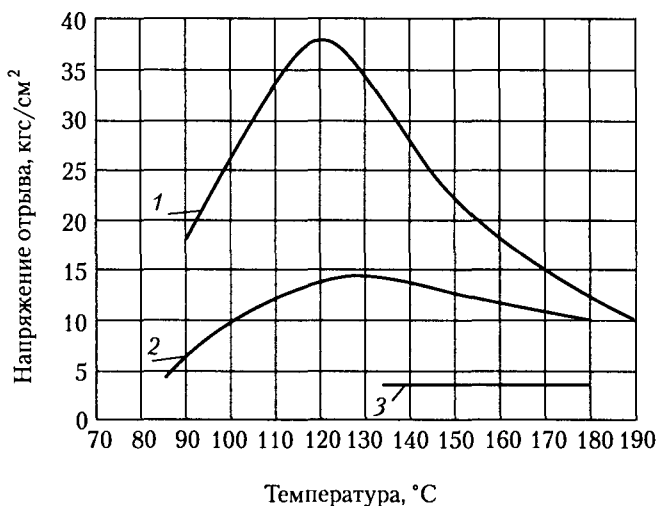


Рис. 7.9. Зависимость адгезии полимера к металлу от температуры [55]:
1 — ПММА; 2 — ПЭВП (ПТР = 2,0); 3 — НПВХ

ПММА обладает высокой формоустойчивостью и прочностью расплава и формирование профилей из него не представляет особых затруднений, однако он очень чувствителен к неравномерности охлаждения и склонен образовывать остаточные напряжения, из-за чего возникают проблемы при экструзии профилей сложной формы, особенно разнотолщинных. Для уменьшения остаточных напряжений охлаждение тонкостенных изделий обычно проводят воздухом, а толстостенных — в горячей воде, температура которой к выходу из ванны постепенно снижается.

Диапазон температур переработки ПММА, например, типа 527, составляет 200–230 °C. При этом температура последней зоны цилиндра не превышает 200 °C, в остальных зонах 160–250 °C, температура на выходе из головки устанавливается в пределах 170–230 °C. При работе с ПММА датчики температуры и контрольные приборы следует проверить и в случае необходимости протарировать, поскольку неправильные показания приборов могут вызвать проблемы при экструзии.

Широкую номенклатуру профильных изделий из ПММА составляют светотехнические профили (рис. 7.10), большинство которых получают из трубообразных заготовок. Полые профили калибруют с помощью вакуумных охлаждаемых втулок, а сплошные получают постепенным пластическим деформированием разрезаемой на выходе из головки трубообразной заготовки. Режущий нож, закрепляемый на торце головки, следует термоизолировать от головки или охлаждать во избежание налипания расплава на нож. Масса ножа должна быть по возможности небольшой.

Для получения светотехнических профилей используют прозрачные или замутненные сорта ПММА. По сравнению с литьем под давлением экструзия профилей светотехнического назначения имеет несомненные преимущества, поскольку позво-

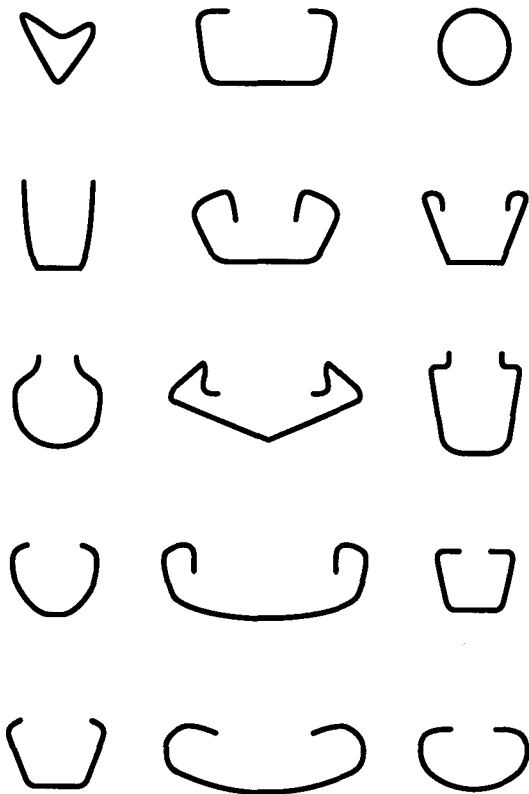


Рис. 7.10. Некоторые типы светотехнических профилей из ПММА, получаемые методом последующего формования (*postforming*) [55]

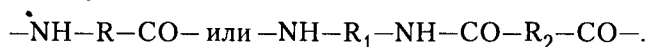
ляет получать светильники неограниченной длины и требует небольших затрат на последующую доделку светильников.

Последующая обработка изделий из ПММА включает все виды механической обработки: сверление, точение, полирование и т. д. С помощью полирования можно достичь высокой прозрачности изделий.

Изделия из ПММА легко склеиваются с помощью типичных высокоактивных органических растворителей: дихлорэтана, бензола, циклогексанона, метилхлорида.

7.5. Полиамиды

Под полиамидами обычно понимают многочисленную группу гетероцепных высокомолекулярных соединений, химические звенья которых, соединенные амидной связью ($-\text{NH}-\text{CO}-$), выражаются схемами:



Исходными материалами для синтеза полиамидов служат лактамы, аминокислоты, диамин, дикарбоновые кислоты с их хлорангидридами и многие другие соединения.

7.5.1. Свойства полиамидов

По внешнему виду полиамиды представляют собой твердые роговидные вещества. В зависимости от состава и степени очистки исходных продуктов их окраска может изменяться от бесцветной до желто-коричневой. Некоторые полимеры, преимущественно смешанные, представляют собой почти прозрачные материалы.

Полиамиды с линейным строением молекул — кристаллические полимеры. Высокая упорядоченность кристаллических структур полиамидов обеспечивает узкий интервал плавления кристаллитов (в пределах 3–5 °C).

Чем больше в макромолекулах полиамида амидных групп, тем выше температура плавления кристаллических структур, выше твердость полимера в кристаллическом состоянии и меньше эластичность. С другой стороны, чем больше метиленовых групп ($-\text{CH}_2-$) в полимере, тем ниже температура его плавления, меньше водопоглощение, ниже твердость, меньше модуль упругости при растяжении, выше химическая стойкость и лучше электроизоляционные свойства.

Полиамиды характеризуются повышенными по сравнению с другими термопластами физико-механическими свойствами [63–68]. Они обладают высокой механической прочностью, большим сопротивлением к ударным нагрузкам и хорошей устойчивостью к истиранию, низким коэффициентом трения по различным материалам, хорошей теплостойкостью и относительно высокой морозостойкостью, негорючестью и хорошими диэлектрическими показателями. Вместе с тем полиамиды имеют ряд существенных недостатков, прежде всего, невысокую устойчивость по отношению к атмосферным воздействиям (влаге, теплу, солнечной радиации). Гомополимеры полиамидов не растворяются в большинстве органических растворителей. Только веще-

При ударных нагрузках, характеризующихся очень высокими скоростями деформации, полиамиды хрупко разрушаются; при снижении температуры испытания характер изменения кривых деформация–напряжение такой же, как при возрастании скорости растяжения. Температура испытания, так же как и скорость растяжения, должна обязательно указываться для сравнения результатов испытания механических свойств полиамидов [63, 64].

Испытание полиамидов на изгиб допускает точное определение модуля при низких значениях деформации.

Сопrotивление материала вдавливанию при действии постоянной нагрузки оценивается по его твердости. Для полиамидов наиболее часто используются способы определения твердости по Роквеллу (шкала *R* и *M*) и Шору (шкала *D*). Эти два метода практически не отличаются друг от друга и используются для испытания материалов и контроля качества промышленных партий. Метод определения твердости по Шору не требует сложной аппаратуры и может использоваться для определения твердости партий полиамидов непосредственно при их изготовлении. Шкалы твердости являются условными, причем показатели твердости по Роквеллу более чувствительны к изменению структуры материала. Например, твердость полиамидов 11 и 12 по Роквеллу при 20 °C составляет 100 ед., а по Шору — 81.

Твердость обычно возрастает с увеличением модуля упругости полиамида и уменьшается с повышением температуры и содержания влаги. Определение твердости рекомендуется в тех случаях, когда возможна корреляция между твердостью и другими свойствами, определение которых трудоемко.

Способность изделий из полиамидов противостоять действию ударных нагрузок зависит от ряда факторов, таких как температура, содержание влаги, концентрация напряжений и анизотропия свойств изделия. Особенно важным при таких испытаниях является определение чувствительности материала к надрезу. Для контроля качества материала при действии ударных нагрузок используются испытания по Изоду или Шарпи. Поведение материала в процессе эксплуатации обычно согласуется с предварительными результатами стандартных испытаний на устойчивость к ударным нагрузкам.

С повышением температуры и содержания влаги в материале прочность на удар полиамидов возрастает; понижение температуры способствует увеличению жесткости и уменьшению ударной прочности. Наличие влаги или пластификаторов несколько уменьшает этот эффект, но не приводит к резкому уменьшению хрупкости. Полиамид с волокнистым наполнителем менее чувствителен к появлению надрезов; кроме того, возрастает прочность на удар по сравнению с ненаполненным полимером при низких температурах. Наиболее стойки к ударным нагрузкам при низких температурах полиамиды 11 и 12.

Полиамиды чрезвычайно устойчивы к действию циклических ударных нагрузок, не приводящих к разрушению образца. В этом отношении они превосходят другие пластмассы, в том числе и ударопрочные.

По своей способности противостоять действию высоких динамических нагрузок полиамиды превосходят большинство других промышленных пластмасс, что обусловлено способностью материала поглощать энергию колебаний. С повышением температуры и содержания влаги в образце поглощение энергии колебаний возрастает.

Поведение полиамидов в условиях длительного воздействия статических и динамических нагрузок определяет эксплуатационные характеристики изделий. Полиамиды, как и другие пластмассы, подвержены ползучести, величина которой зависит от температуры, содержания влаги, природы и количества наполнителя. Увеличение температуры и влажности приводит к возрастанию скорости ползучести, а увеличение степени кристалличности и содержания наполнителя — к уменьшению.

При долговременном нагружении полиамиды могут разрушаться, при этом наполненные полиамиды обычно разрушаются по механизму хрупкого разрушения, не наполненные — с образованием шейки. Заметное влияние на долговечность полиамидов оказывает окружающая среда. В органических жидкостях или водных растворах солей нагруженные детали могут покрываться трещинами, что приводит к значительному уменьшению их долговечности.

Динамическая усталость изделий из полиамидов при знакопеременных циклических нагрузках составляет примерно 10% от статической усталости. С увеличением степени кристалличности и при введении в полимер волокнистого наполнителя динамическая усталость возрастает. При этом короткие волокна более эффективно увеличивают динамическую усталость, чем длинные.

На механические свойства экструдированных изделий из полиамида заметно влияет ориентация. Высокая вязкость расплава способствует увеличению степени ориентации в направлении приложенных сил. По сечению изделия степень ориентации неоднородна: наиболее высокая степень ориентации наблюдается во внешних слоях экструдата, которые быстрее охлаждаются при формовании изделия. Влияние ориентации на механические свойства увеличивается при введении в расплавы полиамидов коротких стеклянных волокон, так как помимо молекулярной ориентации параллельная укладка волокон в направлении течения приводит к значительному возрастанию прочности композиции в этом направлении. Вязкость расплава влияет на ориентацию в наполненных полиамидах так же, как и при отсутствии наполнителя.

В ориентированном образце ударная вязкость меньше в направлении ориентации и больше в поперечном направлении. С повышением температуры формования ударная вязкость возрастает вследствие снижения степени ориентации.

Прочность при растяжении и изгибе возрастают в направлении ориентации, в этом же направлении уменьшается ползучесть, однако ориентация может способствовать появлению в изделиях остаточных напряжений, которые могут быть причиной растрескивания деталей, работающих в активных средах, например, в присутствии поверхностно-активных веществ и в водных растворах некоторых солей.

Полиамиды — хорошие антифрикционные материалы. При скольжении в отсутствие влаги коэффициент трения полиамидов по стали и пластмассе составляет 0,25–0,30, для фторопласта этот показатель составляет 0,04–0,10 [63, 64, 68, 69]. Увеличение температуры и влажности повышает коэффициент трения полиамидов.

7.5.1.2. Физические свойства

Физические свойства полиамидов имеют большое значение при переработке, проектировочных расчетах и определении характеристик готовых изделий.

Плотность. Плотность полиамида зависит от его природы и степени кристалличности. При комнатной температуре эта величина колеблется в пределах $1,01\text{--}1,16\text{ г/см}^3$. Плотность возрастает с увеличением степени кристалличности примерно на $0,01\text{ г/см}^3$ на каждые 10% кристалличности. Скорость охлаждения расплава при переработке, влияя на кристалличность изделия, определяет и его плотность. Плотность по сечению образцов обычно неоднородна: меньше с поверхности и больше к центру толщины стенки. Вытяжка и другие процессы, вызывающие ориентацию и создающие благоприятные условия для кристаллизации, приводят к соответствующему увеличению плотности. Определение плотности часто используют для контроля качества изделий и выявления нарушений технологического режима.

Теплофизические свойства. Полиамиды относятся к частично кристаллическим полимерам, для которых характерно наличие области плавления, протяженность которой зависит от степени кристалличности полимера. При переходе от гомо- к сополиаидам область плавления расширяется. Температура плавления различных полиамидов находится в диапазоне $175\text{--}265\text{ }^\circ\text{C}$, температура стеклования — $43\text{--}180\text{ }^\circ\text{C}$.

Термическое расширение полиамидов также зависит от степени кристалличности и стабильности кристаллической структуры. Коэффициент линейного термического расширения полиамидов составляет $(7\text{--}16) \cdot 10^{-5}\text{ град}^{-1}$. Чем выше содержание в полимере аморфной фазы, тем больше его термическое расширение. Введение инертных наполнителей в полиамиды понижает термический коэффициент расширения, аналогичное влияние оказывают волокнистые наполнители; кроме того, они могут вызывать дополнительные эффекты вследствие ориентации волокна. Термическое расширение стеклонаполненных полиамидов в направлении ориентации волокна меньше, чем неориентированных образцов.

Теплопроводность ненаполненных полиамидов мало зависит от природы и структуры полимера, а также от температуры и для большинства полиамидов составляет $0,16\text{--}0,24\text{ Вт/м} \cdot \text{град}$. Кристаллические и ориентированные области полиамидов имеют более низкую теплопроводность по сравнению с аморфным полимером того же состава. Теплопроводность полиамидов изменяют наполнители, роль которых в общем случае можно оценить, применяя правило аддитивности, использующее их собственную теплопроводность.

Значения теплоемкости промышленных полиамидов находятся в интервале $1,68\text{--}2,43\text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}$. Для наполненных полиамидов эти значения изменяются незначительно.

Полиамиды обладают сравнительно высокой теплостойкостью. Теплостойкость материалов определяют по ГОСТу 12021-92 «Метод определения температуры изгиба под нагрузкой» (или по DIN 53461, ASTM D648) при различных нагрузках [70]. Например, теплостойкость различных ненаполненных полиамидов при нагрузке $0,45\text{ МПа}$ составляет $145\text{--}190\text{ }^\circ\text{C}$, а при нагрузке $1,82\text{ МПа}$ — $50\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$. Наполненные полиамиды имеют более высокую теплостойкость. Поэтому наполнение полиамидов, например, стеклянным волокном, рекомендуется для изделий, работающих при повышенных температурах. Для сравнения в табл. 7.21 приведены физико-механические свойства различных полиамидов.

Таблица 7.21. Физико-механические свойства полиамидов

Показатель	Ultramid (ФРГ)			ПА11 Rilsan (Фран- ция)	ПА 12 Grilamid (Швей- цария)	ПА12 ПЭ-12Э (Рос- сия)
	ПА 6	ПА 6,6	ПА 6,10			
Плотность, г/см ³	1,12–1,15	1,12–1,15	1,06–1,08	1,04–1,06	1,01	–
Водопоглощение при 20 °С, %	8,5–10	7,5–9,0	3–4	6	1,6	–
Теплостойкость под нагрузкой, °С:						
0,45 МПа	160–195	200	195	140–157	–	–
1,82 МПа	90–97	105	95	48–57	–	44
Температура плавления, °С	220	255	215	185	178–180	178–182
Коэффициент линейного термического расширения, 1/(град · 10 ⁻⁵)	7–10	7–10	8–10	9–16	12–15	–
Прочность при разрыве, МПа	125–130	130–135	95–100	50–55	65	50
Относительное удлинение при разрыве, %	150–250	100–200	80–150	250–300	250	70
Модуль упругости при растяжении (при влажности 65%), МПа	1200–2000	1700–2200	1500–1800	350–500	1200	–
Удельная ударная вязкость по Изоду, кДж/м ²	3–10	2–3	4–10	–	–	5

7.5.2. Экструзия полиамидов

Большинство полиамидов имеют низкую вязкость расплава и перерабатываются в основном методом литья под давлением. Экструзия полиамидов стала возможной лишь с получением продуктов, имеющих вязкость 10 000–25 000 пуаз при 30 °С и число вязкости 180–230 [65, 66, 68]. В настоящее время вязкость полиамидов оценивают по удельной вязкости 0,5%-ного раствора полиамида в метакрезоле; по этому показателю экструзионные марки полиамидов должны иметь удельную вязкость не ниже 1,1–1,2. Поскольку наличие влаги оказывает пластифицирующее воздействие и снижает вязкость полимера, содержание влаги в материале перед переработкой не должно превышать 0,15–0,20%.

7.5.2.1. Оборудование и технологическая оснастка

Полиамиды обычно перерабатывают на одношнековых экструдерах. Применение двухшнековых экструдеров не дает особых преимуществ даже в отношении равномерности подачи расплава.

Шнеки. Полиамиды отличаются от большинства термопластов узким диапазоном плавления и резким переходом из твердого в расплавленное состояние. В связи с этим зона сжатия традиционного трехзонного шнека должна быть, по возможности, короткой, иногда даже меньше половины витка. Для переработки высококристаллических полиамидов (полиамидов 6, 66 и 610) рекомендуют параметры шнеков, указанные ниже [63, 69]:

- длина шнека, не менее $20D$ (D — диаметр шнека);
- длина зоны загрузки $13,5D$;
- длина зоны сжатия $0,5D$;
- длина дозирующей зоны, не менее $6D$;
- степень сжатия $2,5:4...4:1$;
- шаг шнека $(1...1,8)D$;
- угол подъема винтовой линии $17^\circ 30'$;
- высота канала зоны загрузки $(0,15...0,20)D$;
- высота канала зоны дозирования, не более $0,08D$.

Для переработки полиамидов 11 и 12 требования к конструкции шнеков менее жесткие. Для них возможно применение шнеков с конической зоной сжатия длиной $(1...8)D$. Промежуточная коническая зона оказывает влияние на равномерность подачи материала. При переработке полиамида 11 типа *Rilsan* лучшие результаты были получены при самых длинных конических зонах сжатия.

Для оптимизации процесса экструзии и увеличения производительности были разработаны различные варианты конструкции шнеков.

Для облегчения удаления влаги и других летучих продуктов из полиамидов иногда используют экструдеры с зоной дегазации, в которых устанавливают пятизонные шнеки с зоной декомпрессии. При работе с такими шнеками необходимо правильно подбирать температурный режим по зонам цилиндра и скорость экструзии для исключения попадания расплава под давлением в отверстие вакуум-отсоса.

Для уменьшения колебания давления и расхода при экструзии зазор между гребнями витка шнека и поверхностью цилиндра должен быть как можно меньше и не превышать $0,15$ мм на диаметр. Лучшие результаты получаются при зазорах:

шнек $D = 45$ мм — зазор $0,08-0,10$ мм;

шнек $D = 60$ мм — зазор $0,10-0,15$ мм.

Цилиндр экструдера. Большинство экструдеров выполняют из азотированных сталей. Иногда на внутренней поверхности цилиндра устанавливают втулку из износостойкого сплава типа *Xalloy*.

При переработке полиамидов особое внимание следует уделять поддержанию температурного режима по длине цилиндра и головки. На цилиндре желательно иметь не менее трех зон нагрева. Обогрев цилиндра производится бандажными электронагревателями. Особенно важно точно поддерживать заданную температуру переходной зоны от цилиндра к головке. Присоединительные фланцы или разъемные хомуты для крепления головок целесообразно подключать к отдельной регулируемой тепловой зоне; при отсутствии такой возможности фланцы или адаптер головки следует теплоизолировать.

Зона загрузки цилиндра экструдера должна охлаждаться циркулирующей водой.

Экструзионные головки. Для производства сплошных и полых профилей из полиамидов используют, как правило, прямоточные головки обычного типа. Для получения профилей с сердечником применяют угловые головки. На входе в головку часто устанавливают решетку; расстояние между концом шнека и решеткой должно составлять 5–15 мм, диаметр отверстий решетки 2–3 мм, оптимальное число отверстий — 40/1 дюйм. Например, для шнека $D = 45$ мм решетка длиной 6 мм имеет 176 отверстий $\varnothing 2$ мм. В экструдерах с «плавающим» шнеком регулировку сопротивления осуществляют изменением величины зазора между коническим концом шнека и втулкой на входе в головку.

Экструзионная головка для производства полиамидных изделий должна иметь не менее двух регулируемых тепловых зон. Формующий инструмент также должен обогреваться или теплоизолироваться.

Несмотря на то что полиамиды относительно термостабильны, в головке не допускаются застойные зоны, так как застой материала может приводить к его перегреву, образованию черных точек и появлению в изделиях повышенных остаточных напряжений.

Полиамиды — вязкоупругие материалы, проявляющие при экструзии такие же эффекты, как и другие термопласты (разбухание, ориентацию). Поэтому при конструировании каналов головки следует учитывать неравномерность разбухания и вытяжку расплава при течении его по каналам сложной геометрии. Например, при экструзии труб из ПА6 диаметр мундштука принимают на 5–10% больше наружного диаметра трубы, диаметр дорна — на 5% больше внутреннего диаметра трубы, а длина формующей части составляет 10–22 толщины стенки трубы [66]. Степень вытяжки экструдата полиамидов находится в пределах 1,5–4,0 для большинства применений.

Калибрующие устройства. Конструкции калибрующих устройств применяются такие же, как и при экструзии других жестких кристаллизующихся полимеров. Перед входом в калибр целесообразно установить приспособление для предварительного охлаждения экструдата воздухом или тонкой струей воды под небольшим давлением или самотеком. Размеры сечения калибрующего канала должны учитывать линейную термическую усадку материала, которая для полиамидов составляет 2,08–2,57%. Припуск на усадку для толстостенных участков принимается больше, чем для тонкостенных.

При производстве полых профилей или труб обычно используют длинномерные вакуумные калибраторы или калибрующие втулки или пластины, установленные в вакуумной ванне. Применение длинномерных калибраторов позволяет получать более точные изделия, чем при использовании калибрующих втулок или пластин. Диаметр отверстий в вакуумных зонах должен быть 0,5–0,8 мм. Возможно использование прорезей вместо отверстий, но толщина их также не должна выходить за указанные пределы, иначе возможны задиры на поверхности профиля или даже нарушение процесса, особенно если вакуум по зонам не регулируется. Обычно в вакуумной зоне имеется 3–4 ряда отверстий с шагом 5 мм. Зоны охлаждения целесообразно охлаждать независимо друг от друга. На входе в калибратор температура воды должна быть 18–25 °С, в последующих зонах — 13–18 °С. Температура воды в охлаждающей ванне должна быть не ниже 15 °С: при температуре воды выше 30 °С изделия становятся излишне пластичными и могут деформироваться в тянущем устройстве, при более

Таблица 7.22. Затраты энергии на плавление различных термопластов

Материал	Количество тепла для плавления полимера, кДж/кг
Полистирол общего назначения (ПС)	272
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	587–712
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	712–838
Полиацетали (ПОМ)	419
Полиамиды (ПА)	628–754
Полиакрилаты (ПММА)	293
Полипропилен (ПП)	586
Поливинилхлорид (ПВХ)	168–356
АБС-пластики (АБС)	314–398
Ацетобутират целлюлоза (АЦБ)	272
Ацетатцеллюлоза (АЦ)	293

Охлаждающие ванны, тянущие, режущие и приемные устройства для производства профилей из полиамидов применяют такие же, как и при переработке других жестких термопластов.

Особенности технологии экструзии полиамидов. Для расплавления полиамидов требуется тепла больше, чем для плавления других распространенных термопластов. Это можно видеть из данных, приводимых в табл. 7.22 [64].

Длительное пребывание материала в цилиндре или головке экструдера приводит к его к деформации и ухудшению качества изделий, в связи с чем необходимо очищать экструдер перед его остановкой. Материал, оставшийся в головке, при налаживании процесса следует полностью обновить новой порцией полиамида.

Полиамиды — гигроскопичные материалы, поэтому перед переработкой следует их подсушить в течение 2–3 часов в токе горячего воздуха в бункерных сушилках при температуре 80–100 °С. Остаточное влагосодержание в материале не должно превышать 0,2%. Производительность экструдера значительно возрастает при использовании предварительно подогретого полимера. Нагрев до 80 °С может увеличить производительность на 30% по сравнению с производительностью при загрузке холодных гранул.

Температурный режим переработки полиамидов зависит от их типа: полиамиды с высокой температурой плавления требуют повышенных температур переработки. В табл. 7.23 приведены ориентировочные температуры по зонам экструдера ($D = 60$ мм, $L/D = 20:1$, частота вращения шнека 60 об/мин) при переработке различных полиамидов [66, 69, 71].

Высоковязкие марки полиамидов обладают хорошей формоустойчивостью и их переработка не вызывает особых затруднений. Необходимо только с высокой точностью поддерживать температуру по зонам цилиндра и головки и не допускать охлаждений полиамида на шнеке ниже температуры плавления. Остановка экструдера с материалом даже на несколько минут может привести к резкому охлаждению расплава.

Таблица 7.23. Температуры по зонам экструдера при экструзии различных полиамидов, °С

Место замера температуры	ПА66	ПА6, ПА610	ПА11, ПА12
В начале цилиндра	250	220	200
В средней части цилиндра	275	250	230
В передней части цилиндра	285	270	250
В головке	280	270	240
В мундштуке	275	260	230
В расплаве	275	255	220

7.6. Экструзия поликарбоната

7.6.1. Свойства поликарбоната

Поликарбонат представляет собой конструкционный полимер со стабильными свойствами в широком диапазоне температур (от -45 до $+120$ °С), обладающий высокой прозрачностью и чрезвычайно высокой прочностью на удар (по сравнению со стеклом более чем в сто раз, а по сравнению с органическим стеклом почти в десять раз). Способы получения ПК, его свойства приведены в [72–75].

Поликарбонат нашел широкое применение в самых различных областях человеческой жизнедеятельности: в оптике, электронике, медицине, авиации, связи и т. д. Корпуса многих современных фотоаппаратов и мобильных телефонов выполнены из поликарбоната. Но самое широкое распространение поликарбонат получил в строительстве, где он применяется главным образом в виде монолитных и профилированных (сотовых) листов различной толщины. Профилированные (сотовые, ячеистые) листы применяются для стекления крыш, изготовления навесов, стенок павильонов, стекления теплиц, парников и т. д.

Поликарбонат перерабатывают в гранулированном виде на одношнековых экструдерах. В настоящее время гранулированный поликарбонат производится рядом крупных химических корпораций (*Bayer*, ФРГ; *Dow Chemical*, США; *GE Plastics*, Бельгия и другие).

Поликарбонат имеет высокую прочность расплава, что позволяет экструдировать большинство его известных марок. Чаще используются более вязкие марки, но окончательный ее выбор зависит от конкретных требований к изделию. В табл. 7.24 приведены физические, механические и термические свойства некоторых зарубежных марок поликарбоната. В табл. 7.25 представлены характеристики некоторых экструзионных марок поликарбоната «Макролон» фирмы *Bayer*, Германия, в табл. 7.26 – свойства экструзионных марок Макролона.

7.6.2. Оборудование и оснастка

Стандартное технологическое оборудование и технологические приемы, используемые при производстве профильных изделий из других термопластов, вполне пригодны и для получения профилей из поликарбоната.

Таблица 7.24. Свойства некоторых марок поликарбоната [74, 78]

Свойства	<i>Lexan</i> , стандартные марки	<i>Lexan</i> , огнестойкие марки	<i>Lexan</i> 500
Физические свойства			
Плотность, г/см ³	1,20	1,24	1,25
Светопропускание, %	86–89	85	–
Водопоглощение в течение 24 ч погружением в воду при 23 °С	0,35	0,35	0,31
Механические свойства			
Предел текучести при растяжении, МПа	63	60	67,5
Прочность при разрыве, МПа	67	67	67,5
Модуль эластичности при растяжении, МПа	2430	2430	3150
Удлинение при разрыве, %, не менее	110	110	10
Прочность при изгибе, МПа	95	95	105
Модуль эластичности при изгибе, МПа	2390	2430	3520
Прочность на удар падающим грузом ($h^* = 3,2$ мм), кгм, не менее	17	17	10
Термические свойства			
Теплостойкость при напряжении 1,82 МПа, °С	135–140	135–140	142
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	1256	1256	1256
Теплопроводность, Вт/(ч · град)	0,20	0,20	0,21
Температура стеклования, °С	147–150	147–150	147–150
Диапазон размягчения, °С	216–227	216–227	216–227
Диапазон экструзии, °С	245–305	245–305	245–305
Диапазон температур разложения, °С	315–345	315–345	315–345
Эффективность процесса экструзии, кВт/кг/ч	0,19–0,29	0,19–0,29	0,19–0,29
Коэффициент линейного термического расширения, 10^{-5} см/(см · °С)	6,7	6,0	3,2
Кислородный индекс	25,0	> 30	32,7

* Толщина образца.

Поликарбонаты могут легко перерабатываться на обычных стандартных одношнековых экструдерах средней мощности с длиной шнека 20...25D. Выбор диаметра шнека зависит от размеров профиля (площади поперечного сечения, массы 1 п. м.) и производительности экструдера, а мощность привода является функцией диаметра шнека. На 1 кг/ч производительности требуется 0,2–0,3 кВт мощности привода экструдера [74].

Система нагрева и регулирования температуры должна обеспечивать нагрев материала до 300 °С. Охлаждение зон цилиндра экструдера обеспечивается воздушными вентиляторами; такое охлаждение удобнее и эффективнее водяного, которое на

Таблица 7.25. Некоторые марки экструзионного поликарбоната «Макролон» фирмы Bayer, Германия [75]

Марка	ПТР*, г/10 мин	Тип
<i>Makrolon 2803</i>	8	Средней вязкости стандартный для литья под давлением, с УФ-стабилизатором
<i>Makrolon 2807</i>	8	Средней вязкости стандартный для литья под давлением, с УФ-стабилизатором и технологическими добавками для облегчения переработки
<i>Makrolon 3103</i>	6	Ненаполненные марки <i>Makrolon</i> для литья под давлением и экструзии, стандартный тип с УФ-стабилизатором
<i>Makrolon 3203</i>	4	Ненаполненные марки <i>Makrolon</i> для литья под давлением и экструзии, стандартный тип с УФ-стабилизатором
<i>Makrolon 1143</i>	< 3	Высоковязкий ПК с УФ-стабилизатором для изготовления профилированных (сотовых) листов
<i>Makrolon KU 1-1217</i> (<i>Makrolon 3107</i>)	6	Типичная марка для литья под давлением и экструзии с УФ-стабилизатором и технологическими добавками

* При $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 1,2\text{ кгс}$.

новых машинах практически не применяется. Охлаждение загрузочной зоны экструдера производится водой при небольшом расходе, так как переохлаждение зоны не рекомендуется.

Высокий коэффициент трения расплава полимера по стали и высокая прочность расплава способствуют достижению высокой производительности процесса в широком диапазоне температур. Между частотой вращения шнека и производительностью наблюдается практически линейная зависимость. При скорости вращения шнека 10–70 об/мин производительность экструдера с диаметром шнека 45 мм составляет 5–30 кг/ч, для $D = 60\text{ мм}$ — 10–60 кг/ч, для $D = 90\text{ мм}$ — 20–140 кг/ч [74, 76]. Азотированные шнеки и цилиндры обеспечивают нормальную переработку поликарбоната с указанной производительностью.

Шнеки. Обычно для экструзии поликарбоната рекомендуют трехзонные шнеки, которые обеспечивают хорошую эффективность переработки. Неплохие результаты показывают шнеки с прогрессивно убывающей глубиной нарезки и постоянной глубиной в последней зоне (зоне выдавливания), а также шнеки с резким переходом в зоне плавления, применяемые обычно для экструзии кристаллизующихся полимеров. Степень сжатия шнеков для переработки поликарбоната находится в пределах 2,2–3. Лучшие результаты показывают трехзонные шнеки со степенью сжатия 2.5:1 [76].

Экструзионные головки. Основные принципы конструирования экструзионных головок для получения профильных изделий из поликарбоната такие же, как и для других термопластов.

Таблица 7.26. Свойства Макролона фирмы *Bayer* [75]

Свойства	Марки			
	2803	2807	3103	3107
Число вязкости J (ИСО 1628-4)	59	59	67	67
ПТР, г/10 мин (ASTM D1238)	8	8	4	4
Объемный индекс текучести, $\text{см}^3/\text{с}$ (ASTM D1238)	7,5	7,5	3,5	3,5
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$ (ASTM D792)	1,2	1,2	1,2	1,2
Светопропускание, % (ASTM D1003)	88	88	88	88
Предел текучести, МПа (ASTM D638)	63	63	63	63
Удлинение при σ_T , % (ASTM D638)	6	6	6	6
Предельное удлинение при разрыве, % (ASTM D638)	120	120	125	125
Модуль эластичности при растяжении, МПа (ASTM D638)	2400	2400	2400	2400
Напряжение ползучести σ_s (ISO 899):				
при испытании 1000 ч, не менее	45	45	45	45
10 000 ч, не менее	40	40	40	40
Температура формоустойчивости при напряжении:				
1,80 МПа	131	131	132	132
0,45 МПа	140	140	142	142
Коэффициент линейного термического расширения α , $10^{-4} \cdot \text{K}^{-1}$ в диапазоне температур 25–80 °C (ASTM D696)	0,70	0,70	0,70	0,70
Теплопроводность λ , Вт/(м · К) (ASTM C177)	0,20	0,20	0,20	0,20
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	1,17	1,17	1,17	1,17
Усадка при переработке, % (температура формы 80–900 °C, температура переработки 290–320 °C)	0,80	0,80	0,80	0,80
Влажность, % (ASTM D570)	0,15	0,15	0,15	0,15

Прежде всего рекомендуется применение решеток и фильтрующих сеток на входе в головку, особенно для оптически прозрачных материалов. При переработке наполненных (особенно стеклонаполненных) марок поликарбонатов решетки не используются. Рекомендуется использовать пакет фильтрующих сеток, состоящий из одной грубой сетки с отверстиями 36–40 меш, двух тонких по 100–130 меш, а затем еще одной прилегающей к решетке грубой сетки с отверстиями 36–40 меш (меш — это увеличенная в 100 раз величина отверстия в мм).

Длина формирующей зоны фильеры обычно составляет 15...20*h* (*h* — высота формирующего зазора в фильере). При конструировании фильеры учитывают вытяжку расплава, которая по высоте и ширине составляет 5–15%.

Разбухание расплава поликарбоната составляет 8–12%, поэтому высота формирующего зазора примерно равна толщине стенки профиля [74]. На рис. 7.11 показаны примеры изменения размеров отверстия фильеры по отношению к размерам профиля для изделий различной формы.

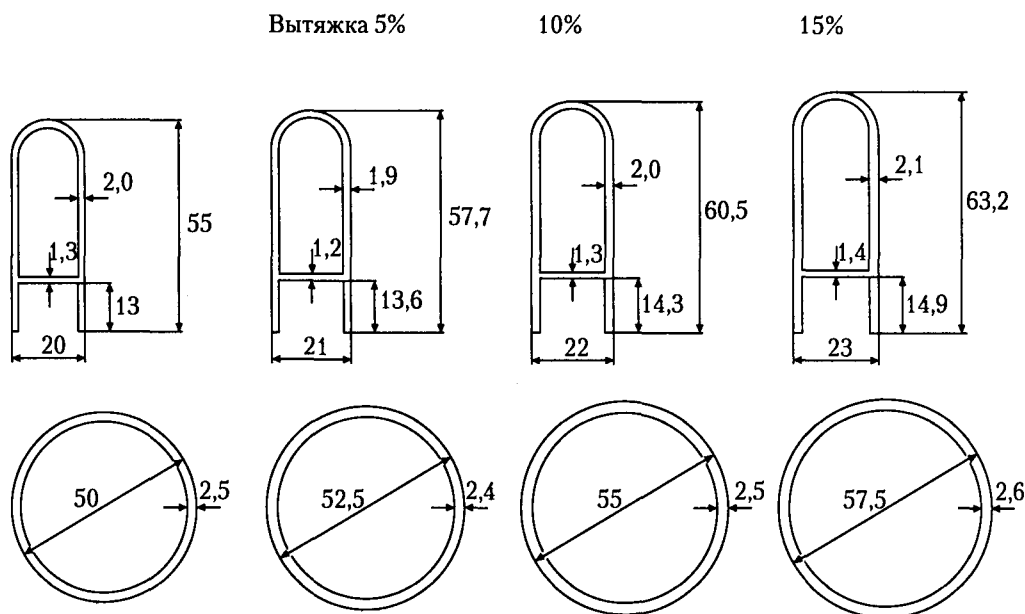


Рис. 7.11. Размеры формирующего отверстия для экструзии труб и профилей из ПК

Благодаря высокой термостабильности расплава поликарбоната его можно экструдировать на головках блендовой конструкции, которые в 1,5–2 раза дешевле головок с обтекаемыми каналами. Для получения трубообразных и некоторых видов полых профилей возможно использование головок, применяемых для экструзии труб или шлангов. Во избежание появления на трубе или полом изделия продольных полос дорнодержатель лучше выполнять по типу решетки с отверстиями, а не со спицами. На входе отверстия обязательно следует раззенковывать. Сужение канала после дорнодержателя способствует «залечиванию» следов от отверстий в дорнодержателе и улучшению качества изделия.

Калибрование и охлаждение профилей. Для калибрования профилей из поликарбоната используются обычные системы калибрования, применяемые для других термопластов: длинномерные вакуумные «сухие» калибраторы, в которых заготовка не соприкасается непосредственно с водой; калибрование в коротких вакуумных блоках, установленных в ванне с водой; калибрование калибрующими пластинами, расположенными в вакуумной ванне (для полых трубообразных профилей); калибрование в перфорированной втулке, расположенной в вакуумной ванне (рис. 7.12 и 7.13).

При «сухом» калибровании профилей калибратор рекомендуется термостатировать и поддерживать температуру на поверхности калибратора на уровне 80–90 °С, это способствует повышению глянца поверхности и снижению остаточных напряжений. При «мокром» калибровании и охлаждении температура воды в ванне должна быть подогрета до 80–90 °С. Уровень воды в ванне должен быть достаточным для

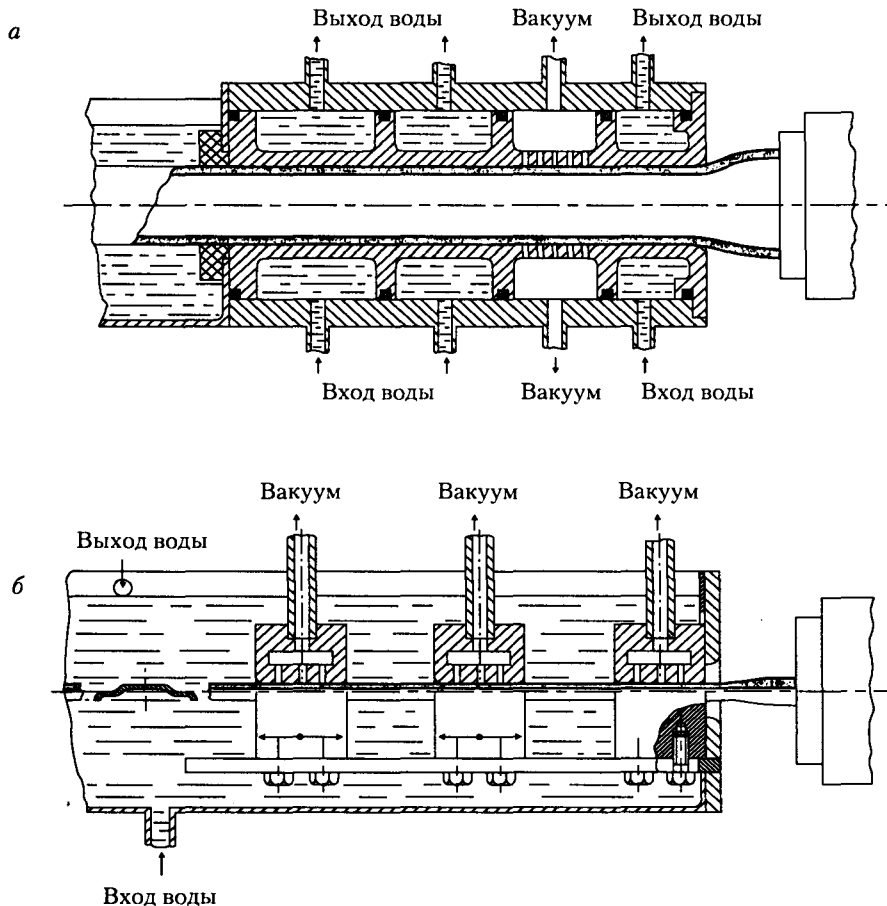


Рис. 7.12. Калибрование труб ПК длинномерным «сухим» калибратором (а) и сплошных профилей вакуумными втулками в охлаждающей ванне (б)

полного погружения профиля, чтобы предотвратить неравномерное охлаждение участков профиля и снизить остаточные напряжения.

7.6.3. Особенности переработки

7.6.3.1. Сушка ПК

Поликарбонат относится к гигроскопичным материалам, поэтому во избежание проблем при переработке и обеспечения высокого качества изделий поликарбонат перед загрузкой в машину должен быть тщательно подсушен. Содержание остаточной влаги в материале не должно превышать 0,015–0,020% [74, 76, 77].

Минимальное время сушки в сушильном шкафу при температуре 120 °С и относительной влажности 50% составляет 2 ч. Печь перед сушкой поликарбоната нужно

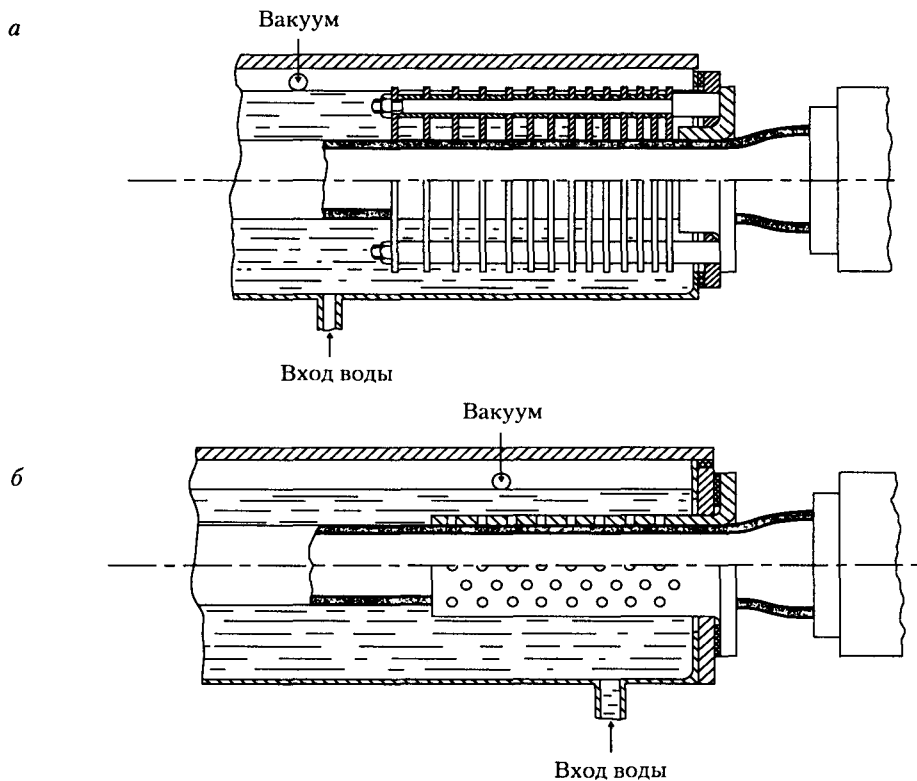


Рис. 7.13. Калибрование труб калибрующими пластинами в вакуумной ванне (а) и вакуумной перфорированной втулкой (б)

тщательно очистить от пыли, следов других материалов и других посторонних предметов. Наличие пыли или следов влаги от летучих материалов может испортить поликарбонат, что выражается в снижении физико-механических характеристик изделия (особенно светопропускания и прочности на удар) и возникновении проблем при переработке (уменьшение прочности расплава, появление полос и пузырьков).

Сушку поликарбоната целесообразно проводить в относительно тонком слое, то есть высота слоя материала в полочных сушилках не должна превышать 2,5 см. Влажный материал или чистые технологические отходы нужно сушить при указанных выше условиях не менее 4 ч. Поликарбонат поглощает влагу из воздуха, поэтому бункер экструдера следует закрывать и не оставлять материал надолго даже в закрытом бункере. Если на экструдере не используется бункерная сушилка, то не следует насыпать в бункер большое количество материала.

При использовании бункерных сушилок предварительная подсушка поликарбоната в сушильном шкафу также возможна для подогрева материала и снижения начальной влажности. Температура воздуха сушки ниже 110 °С не обеспечивает требуемую остаточную влажность материала и высокое качество изделия. В бункерных сушилках

воздух должен равномерно продуваться через толщу материала и обеспечивать устойчивую подачу гранул в горловину экструдера. Вакуумные бункерные сушилки более эффективны, но дороже и требуют повышенных затрат на обслуживание.

До начала переработки поликарбоната цилиндр экструдера следует очистить от следов расплава. Если перед чисткой машины перерабатывался другой термопласт, то его из машины необходимо удалить, так как нагрев любого другого термопласта до температур переработки поликарбоната может вызвать термическое разложение материала и образование «грязи». Наиболее эффективна механическая чистка шнека. Для облегчения механической очистки шнека от следов расплавов термопластов, имеющих высокую адгезию к металлу, лучше применять специальные композиции-консерванты, например, композиции жесткого ПВХ, особенно с наполнителем (например, с мелом, опилками и пр.). Для чистки температуру снижают на 20–30 °С по сравнению с рабочей и прогоняют гранулированную или порошкообразную композицию через цилиндр экструдера (головку следует предварительно снять) при относительно высоких скоростях вращения шнека. Далее шнек вытаскивают из цилиндра и очищают от остатков расплава полимера механическим путем (латунными или медными проволочными щетками или скребками).

Возможно непосредственно перед пуском экструдера удалить из него некоторые термостабильные расплавы путем «прогонки» более вязкого расплава, однако этот способ не рекомендуется, поскольку следы удаляемого материала, особенно полиэтилена, еще долго будут наблюдаться в расплаве поликарбоната, приводя к расслоению изделия или ухудшая оптические свойства расплава.

7.6.3.2. Технологические свойства поликарбоната

Расплав поликарбоната имеет высокую вязкость и сильно прилипает к металлу; выделяемое тепло трения весьма значительно, что ограничивает диапазон скорости вращения шнека. Для большинства применений скорость вращения шнека составляет 10–70 об/мин, что соответствует скорости сдвига на шнеке 10–60 с⁻¹.

В диапазоне скоростей экструзии вязкость расплава поликарбоната практически не зависит от скорости сдвига и несколько снижается с увеличением температуры. В табл. 7.27 приведены значения наибольшей ньютоновской вязкости для некоторых марок поликарбоната при различных температурах.

Таблица 7.27. Наибольшая вязкость поликарбоната Лексан

Марка поликарбоната	Температура, °С	Наибольшая вязкость, Пз
Лексан 130	250	70×10^3
Лексан 130	300	13×10^3
Лексан 100/2034	250	42×10^3
Лексан 100/2034	300	$6,2 \times 10^3$
Лексан 140	250	23×10^3
Лексан 140	300	$4,7 \times 10^3$

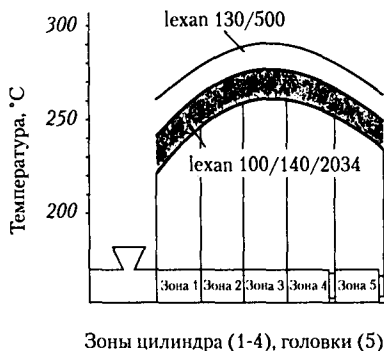


Рис. 7.14. Профиль температур по длине зон экструдера при переработке ПК

7.6.3.3. Температурный режим переработки

Низкая чувствительность вязкости ПК к изменению температуры позволяет экструдировать материал в широком диапазоне температур и регулировать вязкость расплава применительно к различным способам калибрования. Высокая вязкость придает расплаву ПК хорошую формоустойчивость, что способствует сохранению формы экструдата на выходе из головки. Термостабильность поликарбоната сохраняется в широком диапазоне температур переработки, поэтому материал относят к термостабильным.

Температура экструзии различных марок поликарбоната составляет 240–300 °С. Типичный профиль температур по длине зон цилиндра и головки экструдера показан на рис. 7.14. Высоковязкие марки поликарбоната экструдировать на 10–20 °С выше, чем относительно низковязкие.

Пуск чистого экструдера осуществляют при малых частотах вращения шнека и при «голодном» режиме питания экструдера. Следует контролировать нагрузку на привод и, если возможно, крутящий момент на шнеке. После выхода расплава из головки температуру по зонам экструдера при необходимости корректируют в зависимости от качества экструдата и повышают частоту вращения шнека до рабочей. При высокой нагрузке на привод следует повысить температуру на первых двух зонах до 280 °С.

Распределение температур по зонам может изменяться в зависимости от конкретной конструкции экструзионной машины, формы и размеров шнека, типа привода, способа терморегулирования, точности и качества исполнения датчиков и приборов контроля и регулирования и т. д.

7.6.3.4. Остановка машины и чистка

При остановке машины на короткое время понижения температуры по зонам экструдера и выгрузки материала из цилиндра не требуется. При более продолжительной остановке (например, на ночь) температуру на цилиндре и головке снижают до 165–180 °С. Следует иметь в виду, что при температуре ниже 160 °С адгезия расплава к металлической поверхности шнека и цилиндра становится очень высокой. Это может вызвать частичную деполимеризацию материала при последующем нагреве до рабочей температуры и появление черных точек разложившегося материала. Во

избежание этого поликарбонат из цилиндра экструдера перед продолжительной установкой машины следует предварительно удалить другим термопластом. Для этой цели рекомендуется использовать полиакрилаты или прозрачный полистирол общего назначения. После этого шнек, цилиндр и детали экструзионной головки очищаются механическим путем с помощью латунного инструмента.

7.6.3.5. Переработка вторичных отходов

Технологические отходы подвергаются дроблению на дробилках повышенной мощности, специально приспособленных для дробления поликарбоната, после этого либо их гранулируют, либо направляют на вторичную переработку в виде крошки.

Технологические отходы можно перерабатывать несколько раз, корректируя технологический режим переработки по фактическому поведению расплава. Отходы следует обязательно подсушивать до приемлемой остаточной влажности.

Рекомендуется либо использование отходов без примесей, либо в виде смеси с исходным сырьем в соотношении 20:80. В последнем случае регранулят следует сепарировать для подбора частиц одинаковых размеров с основными гранулами.

7.7. Полиацетали

Полиформальдегид (полиоксиметилен) представляет собой продукт полимеризации формальдегида или его тримера — триоксана. Это термопластичный материал с высокой степенью кристалличности. В промышленном масштабе полиформальдегид получают путем полимеризации газообразного формальдегида в инертном растворителе. Наибольший практический интерес представляют полимеры с молекулярной массой 30 000–100 000 [79].

В настоящее время в промышленном масштабе выпускаются два материала, имеющих полиоксиметиленовую структуру: гомополимер и сополимер. Разновидности полиформальдегида имеют общее название ацетальные смолы или просто ацетали.

Типичным примером гомополимера является дельрин, производимый американской фирмой *DuPont* [80, 81]. Соплимер триоксана и окиси этилена производится под торговыми названиями *Hostaform C* (фирма *Hoechst*, ФРГ), *Celcon* (фирма *Celanese*, США) [82–86].

7.7.1. Физико-механические свойства

Ацетальные смолы относятся к группе наиболее жестких термопластов, в которую входят также полиамиды, АБС-пластики, поликарбонат, полифениленоксид. Благодаря стойкости к механическим нагрузкам и истиранию, стабильности размеров изделий и низкому коэффициенту трения полиацетали успешно применяются в качестве конструкционного материала.

В табл. 7.28 представлены характеристики некоторых промышленных марок ацетальных смол, перерабатываемых методом экструзии. Главное различие между продуктами различных марок заключается в молекулярной массе. Высоковязкие полимеры имеют молекулярную массу приблизительно в два раза большую, чем низко-

Таблица 7.28. Свойства промышленных экструзионных марок ацетальных полимеров

Марка	Фирма, страна	Характеристика	Технологические свойства	Области применения
Delrin 150X	DuPont, США	Диацетат гомополимера; $M_n = 80\,000$, $MMP = 2$	Имеет высокую вязкость расплава, не содержит смазки	Трубы, листы, профили, выдувные изделия
Delrin 157X			Не содержит смазки; содержит светостабилизатор	Трубы и профили, устойчивые к УФ-лучам
Tenac 3010			Имеет высокую вязкость. Перерабатывается также литьем под давлением	Применяется для производства стержней, плит, труб, профилей
Tenac 5010	Asahi Chemical, Япония	Гомополимер	Полимер общего назначения. Перерабатывается также литьем под давлением	Производство погонажных изделий, работающих под нагрузкой
Hostaform C, тип C 9020			Не содержит смазки, ПТР 9 г/10 мин	Стержни, кабельные покрытия
Hostaform C, тип C 2530			Не содержит смазки; ПТР 2,5 г/10 мин	Трубы, листы, профили, выдувные изделия
Celcon M10-01	Amcel (филиал фирмы Celanese, США)	Сополимер триоксана с 2% окиси этилена	Высокая вязкость расплава, ПТР 1 г/10 мин	Стержни, листы, плиты
Celcon M25-01			Не содержит смазки, ПТР 2,5 г/10 мин	Стержни, трубы, профили, выдувные изделия, кабельная изоляция
Celcon M90-01			Не содержит смазки. ПТР 9,0 г/10 мин ($T = 190\,^{\circ}\text{C}$, $P = 2,16\text{ кгс}$)	Стержни, плиты, листы, трубы, кабельная изоляция

вязкие. Увеличение молекулярной массы приводит к возрастанию ударной вязкости и эластичности материала.

В настоящее время в России ацетальные полимеры производятся ОАО «Уральская химическая компания» [87] исключительно в виде сополимера триоксана с диоксаланом под общим названием полиформальдегид. Материал имеет повышенную термостабильность при переработке литьем под давлением и экструзией.

По сопротивлению ударным нагрузкам полиацетали близки к полиамидам, но более хрупки, чем поликарбонат. Вместе с тем они обладают большой усталостной прочностью, что позволяет применять полиформальдегид при динамических нагрузках. К недостатку полиацетальных смол относится повышенная чувствительность к надрезу. При наличии в изделии концентраторов напряжений (царапин, трещин, резких переходов, острых углов) величина разрушающей ударной нагрузки снижается более чем в 10 раз [79].

По устойчивости к истиранию полиацетали уступают только полиамидам, но превосходят их по стабильности размеров и влагостойкости. Последнее обстоятельство позволяет широко использовать полиацетали для производства прецизионных изделий.

Верхний предел рабочих температур для деталей, работающих под нагрузкой, находится около 85 °С; появление хрупкости наблюдается при температуре около –60 °С.

Податливость полиацеталей к длительному воздействию статических или динамических нагрузок (ползучесть) несколько выше, чем у аморфных термопластов (при комнатной температуре и небольших нагрузках). Однако при высокой относительной влажности, температурах 60–90 °С и значительных нагрузках ползучесть полиацеталей ниже, чем у всех известных термопластов. По величине усталостной прочности (прочности при динамических нагрузках) и способности восстанавливать форму после снятия напряжения полиацетальные материалы превосходят все другие термопласты.

Ацетальные смолы горючи, горят спокойным бесцветным пламенем, сгорают практически без остатка. Скорость горения такого же порядка, как у полиэтилена и полистирола (2,8 см/с) [79].

Ацетальные смолы не токсичны. Пищевые продукты не оказывают влияния на свойства полимера при длительном хранении.

7.7.2. Оборудование и оснастка

Полиацетали относятся к гигроскопичным материалам, которые перед переработкой необходимо подсушивать. Сушка производится в полочных сушилках с циркуляцией горячего воздуха при температуре 80–95 °С в течение 3–4 ч, при этом толщина слоя материала не должна превышать 25–30 мм. Не рекомендуется сушить в одной сушилке сразу несколько разных марок полиформальдегида [85].

7.7.2.1. Экструдеры

Полиацетали обычно перерабатывают на одношнековых экструдерах длиной 20...25D. Применяют трехзонные дозирующие шнеки с длиной зоны дозирования 4–5 витков, возможно также использование и более длинных шнеков (до 11 витков в зоне дози-

Таблица 7.29. Рекомендуемые размеры шнеков для переработки полиформальдегида [82, 83]

Диаметр шнека D , мм	Шаг, мм	Глубина нарезки в зоне загрузки h_1 , мм	Глубина нарезки в зоне дозирования h_2 , мм	Ширина гребня витка, мм	Степень сжатия, $h_1 : h_2$
38	36	6,7	1,7	3,8	3,9
63	63	11,2	2,8	6,3	4,0
90	90	12,7	3,2	9,0	4,0
115	115	14,2	3,6	11,5	4,0

рования). Глубина канала в зоне дозирования не должна быть слишком мелкой, поскольку в этом случае уменьшается производительность экструдера и наблюдается перегрев материала. При глубокой нарезке материал может расплавиться не полностью. Размеры шнеков для переработки полиформальдегида приведены в табл. 7.29.

Для переработки полиформальдегида с помощью шнеков с малой степенью сжатия (меньше 2:1) необходимо обеспечить высокое противодавление в головке экструдера, например, за счет установки дросселя. Глубина канала шнека и его длина (отношение L/D) более важны для пластикации материала, чем степень сжатия.

Во избежание попадания в экструдат неплавленнных или посторонних твердых частиц на входе в головку рекомендуется установить решетку с пакетом сеток, что особенно важно при переработке отходов или при добавлении вторичного материала к исходному. Обычно употребляется пакет сеток типа 20–60–20 меш.

7.7.2.2. Головки

Для экструзии полиацеталей могут использоваться любые головки: прямоточные, угловые или офсетные. Поскольку полиформальдегид относится к относительно не-термостабильным материалам, то в головке не должно быть застойных зон, а поверхности каналов, соприкасающиеся с расплавом, должны быть полированы.

Для создания в головке достаточно высокого сопротивления рекомендуется применять формирующий инструмент с длинными формирующими участками. Обычно отношение длины формиющего участка к диаметру или к зазору должно быть не меньше 10:1. Углы наклона образующих подводящих каналов головки принимаются в пределах 20–30° [84, 85].

Важен тщательный контроль за температурой деталей головки. Необходимо также контролировать температуру и давление расплава. Это обеспечивает безопасность процесса и помогает быстрее установить оптимальные параметры переработки.

7.7.2.3. Особенности переработки

Для экструзии профилей используют высоковязкие марки полиформальдегида, обладающие повышенной формоустойчивостью расплава. Поскольку расплав полиформальдегида обладает заметной эластичностью, то экструдат на выходе из головки изменяет свою форму и размеры по сравнению с профилирующим отверстием.

Обычно размеры формующего отверстия превышают размеры профиля. Для полиформальдегида *Celcon* рекомендуется ширину формующего отверстия головки увеличивать на 15–20%, а высоту щели — на 10% [85].

Важно обеспечить равномерный выход расплава по всему поперечному сечению формующего отверстия. Небольшую несбалансированность течения можно компенсировать вытяжкой экструдата. Большая разница в степени вытяжки участков профиля приводит к возникновению в изделии остаточных напряжений и к искривлению профиля.

7.7.2.4. Калибрование

Жесткость расплава полиформальдегида быстро возрастает при охлаждении экструдата, поэтому при выборе типа калибрования необходимо учитывать это свойство расплава. Для экструзии относительно простых профилей применяют калибрующие пластины или вакуумные втулки, для более сложных профилей — длинномерные калибры. При использовании набора калибрующих пластин размеры первых пластин принимают на 5–8% больше размеров профиля, последние пластины превышают их на величину термической усадки материала. Расстояния между пластинами или втулками определяются экспериментально по величине заполнения расплавом калибрующего отверстия.

Некоторые типы профилей относительно простого поперечного сечения можно получать из заготовок прямоугольной, цилиндрической или трубообразной формы с помощью пластического деформирования (технология *postforming*).

Окончательное охлаждение профилей из полиацетальных материалов обычно производят с помощью струи воздуха от воздуходувки. Водяное охлаждение не рекомендуется из-за опасности неравномерного охлаждения и возникновения значительных остаточных напряжений.

Чаще всего из полиформальдегида изготавливают полуфабрикаты для дальнейшей механической обработки (стержни и плиты). Из них изготавливают различные втулки и другие детали с точностью, которую невозможно достичь экструзионным способом. Для изготовления стержней используют метод продавливания расплава через двухзонную головку, вторая зона которой представляет собой охлаждаемый калибратор. Экструзия проводится при очень низких скоростях, что позволяет охладить экструдат в охлаждаемой зоне головки на всю толщину (до оси) и предотвратить «пробой» расплава через недостаточно охлажденный слой. Особенностью этого процесса является недопущение сужений каналов в охлаждаемой части головки, поскольку охлаждение ниже температуры кристаллизации приводит к росту давления в головке и к «закупориванию» выхода. Более подробно вопрос производства стержней рассмотрен в главе 8.

7.7.2.5. Пуск и остановка экструдера

Типичный режим экструзии полиформальдегида [83, 85]:

- цилиндр: 160, 185, 185, 185 °C;
- головка: 185, 185, 185 °C.

Привод экструдера включается при малых частотах вращения. После выхода расплава из головки устанавливается рабочая скорость вращения шнека. При этом необ-

ходимо следить за нагрузкой на двигатель и за давлением в головке (при установленном датчике давления). Температура головки не должна снижаться ниже 175 °С.

При остановке экструдера с материалом в головке нужно следить за тем, чтобы не перегреть материал при повторном пуске. Если в экструдере находится другой термопласт, полиформальдегид легко вытеснит этот материал. Обратная операция возможно только с помощью более вязкого, но термостабильного материала. При отсутствии такого материала рекомендуется очистить шнек и детали головки механическим путем.

Остановку экструдера производят после полного прекращения выхода расплава из головки. Перед остановкой снижают частоту вращения шнека и температуру головки до 175–170 °С.

В процессе экструзии профилей из полиформальдегида возникают различные технологические трудности, приводящие к появлению брака. В табл. 7.30 указаны возможные проблемы при переработке экструзией, их причины и способы устранения [85].

7.7.2.6. Переработка отходов

Полиформальдегид допускает многократную переработку без заметного снижения физико-механических свойств. Однако нужно следить за чистотой регранулята и его влажностью. Допускается добавка 25% регранулята к исходному материалу [85].

7.8. Эфиrhoцеллюлозные пластики (этролы)

Эфиры целлюлозы относятся к жесткоцепным, полярным полимерам [88, 89]. По физической структуре они относятся к аморфным материалам. Плотность ненаполненных марок материала составляет 1,16–1,32 г/см³.

7.8.1. Получение и модифицирование

В состав эфиrhoцеллюлозных пластиков всегда вводят пластификаторы, представляющие собой органические соединения, не вступающие в химическую реакцию с эфирами целлюлозы, но повышающие подвижность и гибкость структурных элементов этих жесткоцепных полимеров. Одновременно они придают эфиrhoцеллюлозным пластикам пластичность, расширяют интервал высокоэластического состояния, улучшают морозостойкость, но снижают теплостойкость и твердость изделий.

Температурный диапазон применения эфиrhoцеллюлозных пластиков — от минус 10–50 до плюс 60–115 °С. В качестве пластификаторов применяют эфиры фталевой кислоты, хлорированные полифенилы.

Эксплуатация изделий из высокопластифицированных этролов сопровождается миграцией пластификаторов и уменьшением их концентрации, поэтому для уменьшения потери пластификаторов используют малолетучие компоненты.

В процессе получения, переработки и эксплуатации макромолекулы эфиров целлюлозы подвержены деструкции под действием тепла, кислорода, света и различных примесей (термическая, термоокислительная, термогидролитическая деструкция и деструкция под действием ультрафиолетового излучения). Процессы деструкции

**Таблица 7.30. Возможные проблемы при экструзии профилей из полиацеталей
и пути их устранения**

Проблемы	Причины дефектов и пути их устранения
<p><i>Искажение формы</i></p> <p>а) малы или велики размеры изделия</p> <p>б) искривление профиля</p> <p>в) коробление профиля</p>	<p>Велика или мала вытяжка экструдата</p> <p>Отрегулировать скорость экструзии или скорость отвода профиля</p> <p>Отрегулировать температуру расплава</p> <p>Неравномерное (несбалансированное) течение расплава в головке или неравномерный обогрев головки</p> <p>Отрегулировать положение калибрующих пластин</p> <p>Отрегулировать положение сопел для подачи охлаждающего воздуха или расход воздуха</p> <p>Неравномерное охлаждение</p> <p>Проверить соосность головки, калибрующего и тянущего устройств, обеспечить равномерное охлаждение профиля, уменьшить линейную скорость отвода или обеспечить плавное охлаждение изделия</p>
<p><i>Низкий глянец поверхности профиля</i></p> <p>а) местами</p> <p>б) по всей поверхности</p>	<p>Слишком холодная поверхность калибратора или грубая обработка поверхность в отдельных местах</p> <p>Устранить источники низкого глянца</p> <p>Низкая температура экструзии</p> <p>Повышение температуры расплава или уменьшение скорости охлаждения экструдата повышает глянец изделия, но снижает скорость экструзии. Можно также использовать поверхностное оплавление экструдата инфракрасным нагревателем</p>
<p><i>Шероховатость поверхности</i></p>	<p>Низкая температура расплава или наличие влаги в материале, разрушение расплава при высоких скоростях течения</p> <p>Повысить температуру экструзии, уменьшить скорость, подсушить материал, использовать экструдер меньших размеров или головку с большими размерами формующего отверстия или с длинной формующей зоной</p>
<p><i>Периодическое изменение размеров</i></p>	<p>Неравномерность отвода профиля из-за дефекта привода тянущего устройства или экструдера, колебания напряжения в сети, из-за периодического проскальзывания профиля в траках тянущего устройства</p> <p>Проверить параметры технологического режима, проверить прижатие профиля к тракам тянущего устройства</p>
<p><i>Продольные линии на поверхности профиля</i></p>	<p>Посторонние твердые частицы в головке или в калибрующем устройстве</p> <p>Проверить состояние поверхности каналов головки и калибратора, устранить наличие посторонних частиц, задиров</p>
<p><i>Вмятины на поверхности</i></p>	<p>Неравномерное охлаждение профиля, попадание капель воды на поверхность экструдата</p> <p>Обеспечить предварительное охлаждение экструдата воздухом перед входом в калибратор</p>

приводят к снижению степени полимеризации, уменьшению содержания связанных кислот, выделению газообразных продуктов (двуокиси и окиси углерода, водорода, метана) [88].

При получении высокопрозрачных изделий из эфироцеллюлозных материалов необходимо принимать меры для предотвращения или уменьшения потемнения пластика. Для этого в состав материалов вводят стабилизаторы в количестве 0,001–0,5 масс. ч. на 100 масс. ч. эфира целлюлозы. Для повышения стойкости к действию атмосферных факторов в состав композиций вводят светостабилизаторы в количестве 0,5–2,0 масс. ч. Введение стабилизаторов в композиции на основе эфиров целлюлозы обязательно.

Эфироцеллюлозные пластики отлично окрашиваются в массе красителями и пигментами. Большое значение при крашении имеет дисперсность пигментов: с увеличением степени дисперсности возрастает интенсивность окраски. Хорошие результаты для получения прозрачных окрашенных изделий дают такие пигменты, как голубой и зеленый, фталоцианиновые, пигмент желтый прочный и некоторые другие. Широкая цветовая гамма окрашенных пластмасс достигается смешением красителей в различных соотношениях. Готовые изделия из пластмасс на основе ацетата и ацетобутирата целлюлозы можно окрашивать поверхностным способом в водяной ванне в присутствии бензина, денатурированного спирта и ацетона.

Для придания материалу какого-либо определенного свойства или группы свойств в состав композиций вводят модификаторы, наполнители, смазки и другие специальные добавки, применение которых эффективно только при содержании в композиции не более 5%. Большинство полимерных модифицирующих добавок улучшает ударопрочность и другие физико-механические свойства эфироцеллюлозных пластмасс.

Для улучшения перерабатываемости эфироцеллюлозных пластиков в них вводят смазки, наполнители и другие специальные добавки. В качестве смазок, предотвращающих прилипание изделий к стенкам формующего инструмента, обычно применяются этилолеат, стеарин, парафин, несовмещающиеся с эфиром целлюлозы пластификаторы в количествах до 0,2%. В некоторых случаях для удешевления пластмасс в их состав можно вводить наполнители: мел, каолин и тальк, при этом стойкость к ударным нагрузкам и относительное удлинение при разрыве (особенно при содержании наполнителей более 20%) снижаются.

Огнестойкость ацетобутиратцеллюлозного этрола повышает введение в композицию смеси гидроокиси алюминия и окиси сурьмы с антиоксидантами в количестве до 60%.

Торговые названия и фирмы-производители эфироцеллюлозных пластиков приводятся в табл. 7.31.

7.8.2. Свойства и области применения

Физико-механические, диэлектрические, теплофизические показатели этролов зависят от их типа и состава композиций. В табл. 7.32 приведены свойства для основных типов эфироцеллюлозных пластмасс [88]. Путем модификации получают этролы специального назначения с заданным комплексом свойств [88–91]. В табл. 7.33 приведены свойства ацетобутиратцеллюлозных этролов с повышенной морозостойкостью.

Таблица 7.31. Основные фирмы, производящие эфиrhoцеллюлозные пластики [88]

Торговое название пластмассы	Фирма	Страна
<i>Ацетатцеллюлозные</i>		
Aceyloid	<i>Dainippon Celluloid</i>	Япония
Cellidor A. S. U.	<i>Bayer</i>	ФРГ
Dexel	<i>British Celanese</i>	Великобритания
Rhodanite	<i>Rhone-Poulenc</i>	Франция
Rhodialite	<i>Rhone-Poulenc</i>	Франция
Tenite I	<i>Eastman Chemical</i>	США
<i>Ацетобутиратцеллюлозные</i>		
Cellidor B	<i>Bayer</i>	ФРГ
Tenite II	<i>Eastman Chemical</i>	США
<i>Ацетонпропионатцеллюлозные</i>		
Celadex	<i>British Celanese</i>	Великобритания
Cellidor P	<i>Bayer</i>	ФРГ
Tenite III	<i>Eastman Chemical</i>	США
<i>Этилцеллюлозные</i>		
—	<i>Hercules Inc.</i>	США
—	<i>Sninctsu Chemical</i>	Япония

7.8.2.1. Применение

Этролы характеризуются высокими прочностными показателями при действии знакопеременных нагрузок, высокой длительной прочностью, сравнительно высокой прочностью при сдвиге и кручении и могут эксплуатироваться в широком интервале температур.

Из погонажных профильных изделий наиболее широко известны различные так называемые «молдинги» (прозрачные, металлизированные или армированные алюминиевой фольгой профили, используемые для наружной отделки кузовов легковых автомобилей, автобусов взамен профилей из нержавеющей стали). Подобные профили могут применяться также в мебельной промышленности для окантовки кромок столов, в качестве декоративных накладок, направляющих, полозков.

В табл. 7.34 приведены свойства трех типов АЦБ этрола *Cellidor* производства фирмы *Bayer*, ФРГ.

По стойкости к старению ацетобутиратцеллюлозные этролы значительно превосходят ацетатцеллюлозные.

7.8.3. Особенности переработки

7.8.3.1. Реологические свойства

Эффективность переработки этролов в вязкотекучем состоянии зависит от вязкости расплава при температуре переработки. Реологические свойства этролов подобны

Таблица 7.32. Свойства этролов

Показатели	Ацетатцеллюлозные этролы	АПБ-этролы	Ацетопропионаг- целлюлозные этролы	Этилцеллюлозные этролы	Нитроцеллюлозные этролы
Плотность, г/см ³	1,0–1,4	1,15–1,25	1,19–1,23	1,2–1,4	1,8–1,9
Прочность при изгибе, МПа	30–50	30–60	30–70	35–66	36–40
Прочность при растяжении*, МПа	20–35	20–40	20–50	35–45	25–40
Относительное удлинение при разрыве, %	5–20	15–60	15–35	10–25	8–9
Прочность на удар по Шарпи, кДж/м ² :					
при 23 °С	25–55	40	50–80	25	4–5
при –40 °С	5–15	10–60	5–35	10–40	2–3
Теплостойкость по Вика, °С	60–80	50–90	60–100	45–85	70–80
Водопоглощение, %	2,0–5,5	0,5–2,0	1,1–2,0	0,8–2,0	0,3–1,0
Твердость по Бринеллю, МПа	30–80	35–70	40–90	40–80	40–70
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · см	10^{10} – 10^{13}	10^{12} – 10^{16}	$5 \cdot 10^{12}$ – $5 \cdot 10^{13}$	10^{12} – 10^{13}	10^{12}
Диэлектрическая проницаемость:					
при 60 Гц	5–7	3,5–4,1	4,0–4,2	3–4	–
при 10^6 Гц	4–5	3,2–3,6	3,5–3,7	3–3,5	–
Электрическая прочность, кВ/мм	24–32	31–36	31–35,5	14–15	7–10
Температура, °С:					
стеклования, T_c	65–85	60–90	60–95	50–80	60–70
плавления $T_{пл}$	150–170	150–170	160–190	150–170	140–160
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	1,26–1,76	1,26–1,68	1,26–1,68	–	–
Коеф. теплопроводности, Вт/(м · К)	0,16–0,21	0,20–0,21	0,20–0,22	0,15–0,28	0,23–0,26
Коеффициент линейного термического расширения при 20–50 °С, 1/°С	10^{-4}	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$ – $1,45 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Стойкость к средам (1)	Удовлетворительная	Отличная	Хорошая		
Стойкость к (2)			Набухают		
Стойкость к (3)	Нестойки, разрушаются		–	–	–
Стойкость к (4)	Отлично растворяются		Растворяются		

* При скорости растяжения 50 м/мин.

(1) – вода, водные растворы солей, нефтепродукты, минеральные масла, бензин, простые эфиры, разбавленные серная и соляная кислоты; (2) – спирты, формалин; (3) – концентрированные кислоты, щелочи, разбавленные кислоты; (4) – ацетон, этилацетат, метилхлорид, другие органические растворители.

Таблица 7.33. Свойства морозостойких АЦБ этролов*

Показатели	АЦБЭ-15АТ	АЦБЭ-15ДСМ	АЦБЭ-17.5	АЦБЭ-20	АЦБЭ-22,5	АЦБЭ-25
Прочность при растяжении, МПа	30	25	23	21	18,5	17
Прочность при изгибе, МПа	40	35	28	25	21	18
Прочность на удар при -40°C , кДж/м ²	20	40	50	70	75	70
Относительное удлинение при разрыве, %	50	50	45	50	55	55
Теплостойкость по Вика, $^{\circ}\text{C}$	85	72	65	64	58	55
ПТР ($T = 190^{\circ}\text{C}$, $P = 16\text{ Н}$), г/10 мин	3	5	10	15	17	22
Температура хрупкости, $^{\circ}\text{C}$	-35	-40	-50	-50	-50	Ниже -50

* Цифры в обозначении марок этролов показывают содержание в них пластификаторов в масс. ч. на 100 масс. ч. ацетобутирата целлюлозы.

свойствам большинства термопластов: при низких напряжениях сдвига течение расплавов приближается к ньютоновскому. При более высоких напряжениях сдвига у них появляется довольно резко выраженная аномалия вязкости, которая увеличивается с понижением температуры.

Этролы характеризуются высокими значениями энергии активации вязкого течения, равными 35–45 ккал/моль.

При определении реологических свойств этролов входные поправки, учитывающие потери давления на входе и характеризующие эластические свойства расплавов, не превышают 4.

Повышение температуры вызывает значительное снижение вязкости расплава, что следует учитывать при выборе оптимального режима переработки. На рис. 7.15 показано изменение вязкости АЦБ-этрола в зависимости от скорости сдвига при температуре 190°C .

7.8.3.2. Оборудование

Для производства профильных изделий из этролов лучше использовать одношнековые экструдеры с зоной дегазации, расположенной на расстоянии 60–70% его длины от загрузочной воронки. Можно также применять стандартные экструзионные агрегаты с длиной шнека $20...25D$. Стандартные трехзонные шнеки используют со степенью сжатия 1,8–3,0. В табл. 7.35 и 7.36 приведены характеристики шнеков, рекомендуемых для экструзии этролов без дегазации и с дегазацией расплава.

7.8.3.3. Особенности переработки

Этролы относятся к гигроскопичным материалам, которые перед переработкой необходимо подсушивать до остаточной влажности 0,1–0,2%. Даже при применении экст-

Таблица 7.34. Свойства АЦБ этролов типа *Cellidor* [89]

Характеристика	Метод испытания	Марки		
		<i>Bsp WW</i>	<i>Bsp M</i>	<i>Bsp HH</i>
Плотность, г/см ³	DIN 53479 ISO R1183	1,17	1,19	1,22
Прочность при растяжении, МПа	DIN 53455 ISO-R 527	21	36	58,5
Относительное удлинение при разрыве, %	DIN 53455 ISO-R 527	3,6	3,9	3,75
Прочность при сжатии, МПа	DIN 53454 ISO-R 604	19	35	47,5
Прочность при изгибе, МПа	DIN 53452 ISO-R 178	29	46	61
Модуль упругости при растяжении, ГПа	DIN 53457	0,9	1,5	2,0
Прочность на удар, кДж/м ² : при 20 °С	DIN 53453 ISO-R 179	Не разрушается Не разрушается	≥ 90	≥ 100
при -40 °С				≥ 70
Прочность на удар образцов с надрезом, кДж/м ²	DIN 53453 ISO-R179	35	26	5
Прочность на удар по Изоду, Дж/м	ASTM D256 ISO 180	280	130	55
Твердость по Бринеллю, МПа	DIN 53456	—	—	85
Твердость по Роквеллу (метод А), шкала R	ASTM D785	52	90	110
Температура текучести (метод А), °С	ASTM D569	131	147	165
Теплостойкость по Вика, °С	DIN 53460 ISO R306	57	79	105
Формоустойчивость при нагреве, °С: при 1,82 МПа	DIN 53461 ISO 75	59	67	85
при 0,45 МПа		64	80	104
Коэффициент линейного термического расширения $k \cdot 10^{-6}$, 1/К	VDE 0304	148	129	115
Теплопроводность, Вт/(м · К)	VDE 0304	0,221	0,209	0,198
Удельная теплоемкость, кДж/кг	—	1,26–1,67	1,26–1,67	1,26–1,67
Показатель преломления	DIN 53491	1,47	1,48	1,48
Водопоглощение за 4 сут, мг	DIN 53495	65	70	80

Примечание. *Bsp WW* — особо мягкий АЦБ этрол; *Bsp M* — средней жесткости, *Bsp HH* — особо жесткий.

рудеров с зоной дегазации стадию подсушки материалов исключить полностью не удастся, однако при этом допускается применение этролов с влажностью до 0,6% [88].

Температура экструзии в зависимости от марки этрола и типа экструзионного агрегата составляет 160–230 °С [88, 90, 92]. По длине зон экструдера температура постепенно повышается к выходу из головки.

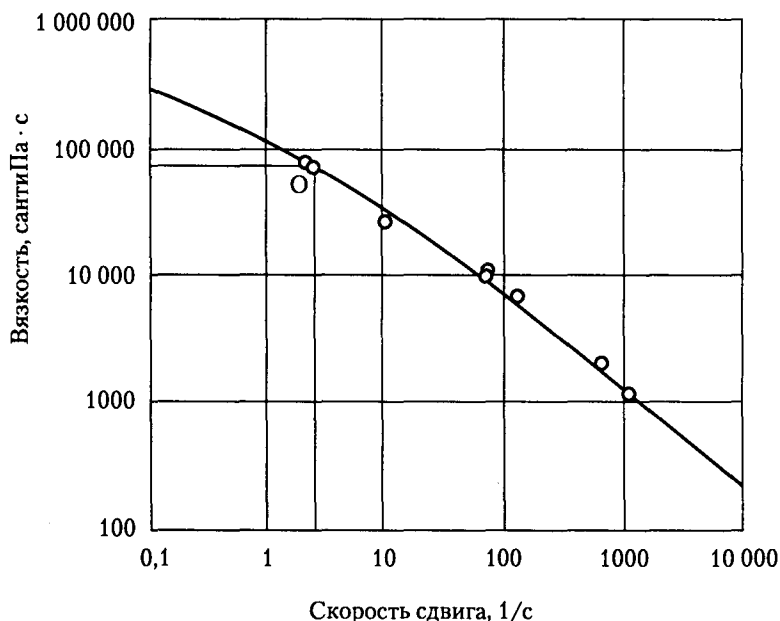


Рис. 7.15. Влияние скорости сдвига на вязкость расплава АЦБ этрола при температуре 190 °С. Точкой О на кривой течения отмечены условия определения ПТР (температура 190 °С, нагрузка 2,16 кгс)

Для производства трубообразных, полых и сплошных профилей используются прямоточные и угловые экструзионные головки. Тонкостенные трубы и трубы небольшого диаметра калибруются с помощью вакуума, а трубы большого диаметра — с помощью сжатого воздуха или вакуума. Усадка этролов при охлаждении составляет 0,2–1,1% [92], поэтому диаметр калибрующей втулки обычно принимают на 1,5–2,0% больше наружного диаметра трубы [88]. Для уменьшения остаточных напряжений в изделиях необходимо обеспечить равномерность охлаждения экструдата при калибровании.

При переработке этролов удельный расход электроэнергии составляет 0,1–0,4 (кВт·ч)/кг.

С увеличением температуры экструзии снижается прочность изделий при растяжении и повышается относительное удлинение при разрыве, при этом изделия из этролов становятся более эластичными, кроме того снижаются остаточные напряжения и повышается прочность на удар; однако вести процесс при высоких температурах иногда бывает затруднительно вследствие резкого снижения вязкости расплава и уменьшения формоустойчивости экструдата.

С повышением температуры экструзии снижается анизотропия свойств в продольном и поперечном направлении и уменьшается последующая усадка изделий. Температуры экструзии для этролов с меньшим содержанием пластификатора должны быть выше.

При длительном воздействии температуры на расплав происходит частичная деструкция материала и его пожелтение или даже потемнение. Поэтому не рекомендуется оставлять материал в цилиндре экструдера.

Таблица 7.35. Характеристики шнеков для экструзии этролов без дегазации расплава [88, 89]

Зона шнека	Длина зон для шнеков длиной		Высота нарезки при диаметре шнека D , мм		
	$20D$	$25D$	60	90	120
Загрузки, D	9	12	7–10	10–15	15–18
Сжатия, D	4	5	Переменная	Переменная	Переменная
Выдавливания, D	7	8	2,5–3,5	3,5–5,5	5,5–6,5

Таблица 7.36. Характеристики шнеков для экструзии этролов с дегазацией расплава [88]

Характеристика	Диаметр шнека D , мм	
	60	90
Длина зоны загрузки, D	9	7
Глубина канала в зоне загрузки h_1 , мм	10	12–15
Длина первой зоны сжатия, D	1	5
Длина первой зоны гомогенизации, D	6	8
Глубина канала 1-й зоны гомогенизации h_2 , мм	2,5	4,15
Длина зоны дегазации, D	6	6
Глубина канала зоны дегазации h_3 , мм	10	14,85
Длина второй зоны сжатия, D	1	4
Длина второй зоны гомогенизации, D	8	4
Глубина канала 2-й зоны гомогенизации, h_4 , мм	4	8,2
Степень сжатия:		
$h_1 : h_2$	4	2,94
$h_1 : h_4$	2,5	1,18
$h_2 : h_4$	1,6	1,95

7.8.3.4. Переработка отходов

Отходы этролов после дробления на ножевых дробилках в крошку размером 4–5 мм можно добавлять в количестве до 10% в гранулят того же типа и марки. Недопустимо смешение отходов этролов на основе разных эфиров целлюлозы.

В качестве критерия возможности повторной переработки любого этрола можно считать уровень удельной вязкости 0,25%-ного раствора эфира целлюлозы в ацетоне, который при 20 °С должен быть не менее 0,26 [88].

7.8.4. Техника безопасности

Эфироселлюлозные пластики относятся к горючим материалам, поэтому необходимо тщательно соблюдать меры пожарной безопасности.

При переработке гранулированных этролов могут выделяться летучие продукты разложения самих эфиров целлюлозы, особенно при высоких температурах переработки, с связи с чем необходима хорошая общеобменная и местная вытяжная вентиляция.

В настоящее время в связи с проблемами обеспечения производства этролов сырьем эти материалы постепенно вытесняются другими термопластами. Так, вместо непрозрачных марок АЦБ-этрола в ряде случаев используется сплав поликарбоната с АБС-пластиком (например, Байбленд фирмы *Bayer*, ФРГ).

7.8.5. Последующая обработка изделий из этролов

7.8.5.1. Механическая обработка

Изделия из этрола обрабатываются при комнатной температуре теми же способами, что дерево и металлы: распиловкой, сверлением, фрезерованием, шлифовкой [88, 89]. При этом лучше всего применять режущий инструмент, используемый для обработки алюминия. Не рекомендуется обрабатывать этролы в холодных сухих помещениях. Перед обработкой этрольные изделия целесообразно выдерживать в течение 24 ч в производственном помещении. Некоторые типы этролов, например, ацетатцеллюлозные при обработке требуют подогрева до 30–35 °С, чтобы предотвратить образование сколов и разрывов. При обработке этролов резцами величина подачи не должна превышать 0,1 мм/об.

7.8.5.2. Склеивание

Изделия из этролов хорошо склеиваются. Для склеивания плотно прилегающих больших поверхностей изделий из АЦ-этролов может быть рекомендован ацетон. Для склеивания АЦБ этролов применяют смеси ацетона с метилцеллозольацетатом (70:30), бутилацетата с бутиллактатом (80:20) и др. Композиции, приготовленные из 90 масс. ч. указанных растворителей и 10 масс. ч. этрола, также служат хорошими клеями и могут применяться для склеивания изделий сложной формы.

7.9. Пеноматериалы

Свойства, методы производства, переработки и применения вспенивающихся термопластов приводятся во многих источниках [93–95, 108], поэтому нет необходимости

останавливаться подробно на вопросах, касающихся физико-механических свойств, методов производства, морфологии, применения таких материалов. В настоящем разделе основное внимание уделяется особенностям переработки вспенивающихся композиций при производстве различных профильных изделий, выбору технологического оборудования и оснастки.

Большинство профильных изделий из пеноматериалов относится к так называемым «интегральным пенопластам», которые имеют плотную монолитную внешнюю оболочку и пористую сердцевину с замкнутыми несообщающимися ячейками. Благодаря такой структуре пенопласты имеют довольно высокие механические характеристики, низкую теплопроводность, легко подвергаются различным видам механической обработки. Указанные свойства позволяют широко использовать профили из интегральных термопластов в самых различных областях, особенно в строительстве и в мебельной промышленности. Ниже приводятся типичные области применения некоторых типов профилей из различных вспенивающихся материалов.

7.9.1. Применение

7.9.1.1. Строительство

Профили из пено-ПВХ:

- конструкционные — некоторые типы оконных и дверных комплектующих профилей, дверные панели;
- декоративно-отделочные — плинтусы, поручни, наличники, рейки и пр.

Профили из пенополистирола:

- конструкционные-стенные, дверные панели, детали сэндвич-конструкций;
- декоративно-отделочные — потолочные панели, «лепнина».

Профили из пенополиэтилена:

- конструкционные — подставки под холодильники, стиральные машины, стеллажи;
- декоративно-отделочные — дверные наличники, плинтусы.

7.9.1.2. Мебель

Профили из пено-ПВХ:

- конструкционные — выдвижные ящики столов, шкафов, полки книжных шкафов, детали стеллажей, фиксаторы;
- декоративно-отделочные — уголки, рейки, детали кухонной мебели и пр.

Профили из пенополистирола:

- конструкционные — стенные, дверные панели, детали сэндвич-конструкций;
- декоративно-отделочные — потолочные панели, «лепнина».

7.9.1.3. Транспорт

Профили из пено-ПВХ и пенополистирольных пластмасс — трубки, уголки, накладки, подкладки и пр.

По внешнему виду пенопрофили похожи на деревянные и успешно конкурируют с деревянными изделиями по целому ряду свойств. Однако по сравнению с деревянными экструзия пеноматериалов может быть экономична только в случае производства достаточно сложных профилей, которые из дерева получать дорого и трудоемко. Экструзия вспененных термопластов сопряжена с определенными трудностями, связанными с выбором технологического оборудования, формующего и калибрующего инструмента, с разработкой хорошо перерабатывающихся композиций, наладкой технологического процесса. Поскольку вспенивание материала происходит на выходе из формующего инструмента, то для обеспечения плотной внешней оболочки изделия необходимо быстро охладить поверхность экструдата при одновременном придании заготовке требуемой формы. Переработка различных пеноматериалов имеет свои специфические особенности, которые рассматриваются ниже.

Производство профилей из пеноматериалов в значительной мере основано на химическом методе вспенивания, заключающемся в разложении под действием высокой температуры специального газообразователя (порофора) и в растворении и насыщении расплава полимера выделяющимся газом. Поскольку чаще всего в качестве порофора используют азодикарбонамид (в России он выпускается под маркой ЧХЗ-21), то при его разложении выделяется азот. При применении других газообразователей может выделяться углекислый газ.

7.9.2. Пенополивинилхлорид

Наибольшее распространение получило производство профильных изделий из вспениваемых композиций жесткого ПВХ. В настоящее время 95% всех пенопрофилей изготавливают из жесткого ПВХ. Процесс экструзии пенопластов качественно отличается от экструзии монолитных термопластов, что связано с наличием в исходной композиции газообразователя. Наиболее сложной проблемой при этом является удержание в расплаве выделяющегося газа, что обуславливает требуемую плотность материала в изделии. При использовании оптимальной конструкции шнека, каналов экструзионной головки, при правильном выборе схемы калибрования и режимов экструзии преждевременное или слишком бурное выделение газа можно предотвратить и получить качественную продукцию.

Среди экструзионных методов изготовления интегральных пенопрофилей наибольшее распространение получили способы *Celuka*, разработанный фирмой *Ugine Kuhlmann* (Франция) и метод прямого вспенивания, впервые использованный американской фирмой *Goodrich Chemicals*. Для производства труб из пено-ПВХ используются методы Армосель фирмы *Armosig* (Франция) и *Ekazel* (Германия). Обзор способов производства профилей и труб из пено-ПВХ приводится в [96–98].

На рис. 7.16 приведены принципиальные схемы производства изделий из вспениваемых материалов методом экструзии.

Метод *Celuka* применяется при производстве массивных и толстостенных профилей. Сущность метода заключается в следующем: после пластикации в цилиндре экструдера расплав полимера, содержащий химический газообразователь, поступает в экструзионную головку, в которой обязательным элементом является дорн. Поскольку на выходе из головки вспенивание наружу ограничено установленным вплотную

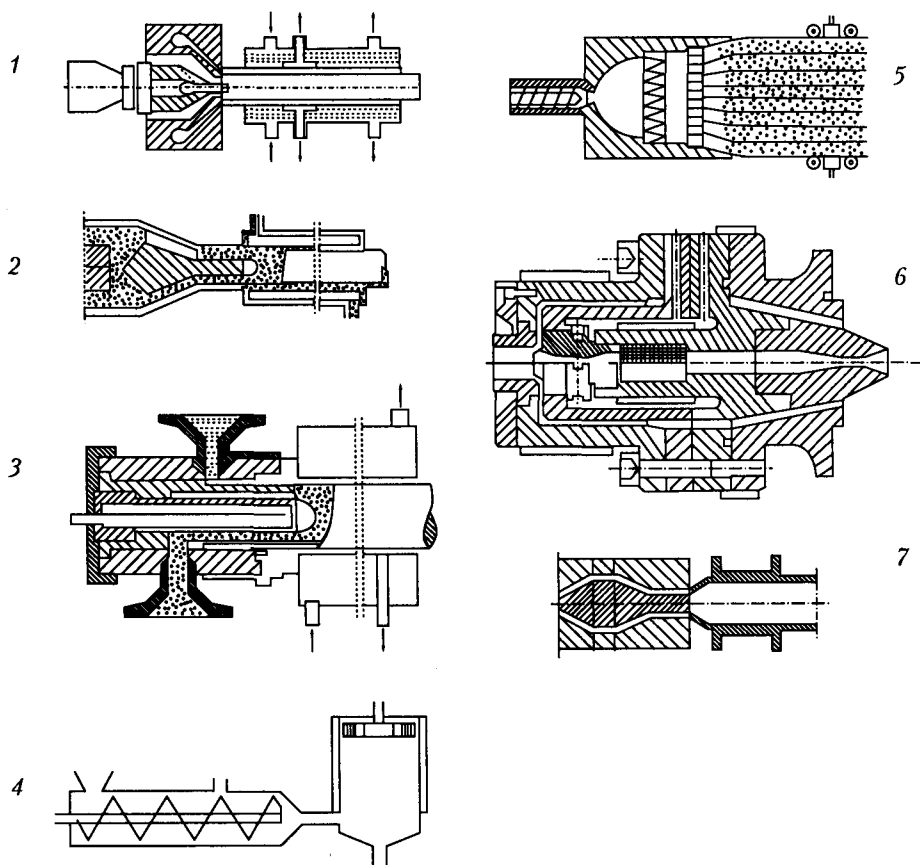


Рис. 7.16. Запатентованные способы производства вспененных изделий из полимерных материалов:

1 — труб с гладкой оболочкой (DP 1183 238, фирма *Reifenhauser*, ФРГ); 2 — метод *Celuka* (FP 1498620, фирма *Kuhlman*, Франция); 3 — профили с плотной оболочкой по методу *Celuka* (DOS 1913921, фирма *Kuhlman*); 4 — изготовление пеноизделий на экструдере с копильником в головке (DOS 2000039, фирма *BASF*, ФРГ); 5 — производство толстостенных изделий на головке с решеткой (DOS 2038801, фирма *Seikisui Kogyo*, Япония); 6 — головка для производства двухслойных пенопрофилей методом соэкструзии (DAS 2116940, фирма *Scherer & Trier*, ФРГ); 7 — производство труб из НПВХ по методу *Armocell* (DOS 2128976, фирма *Armosig*, Франция)

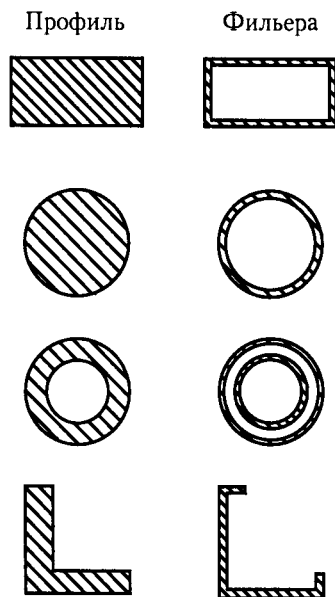


Рис. 7.17. Соответствие между формой профиля и фильеры при изготовлении пенопрофилей по методу *Celuka* [99]

к головке калибрующим устройством, внешние размеры которого соответствуют размерам мундштука, то вспенивание осуществляется внутрь. На рис. 7.17 показана форма профиля и соответствующая ему форма фильеры при производстве изделий из пено-ПВХ [99].

По методу *Celuka* можно получать профили различной конфигурации с монолитной поверхностью и жесткими допусками на размеры вследствие того, что материал остается сжатым в калибрующем устройстве до тех пор, пока форма профиля не стабилизируется. На толщину наружной корки и плотность пористой сердцевины оказывают влияние условия охлаждения, скорость экструзии и размеры дорна. Плотность полученных профилей составляет обычно порядка 50% от плотности профилей из невспененного ПВХ. Недостатком процесса является малая скорость экструзии, составляющая 0,2–0,3 м/мин [94].

Процесс получения пенопрофилей по методу свободного вспенивания (процесс *Goodrich*) мало отличается от обычного процесса экструзии труб и профилей из термопластов. Вспенивание экструдата осуществляется на выходе из головки. Далее экструдат попадает в вакуумную или открытую охлаждающую ванну, в которой установлены калибрующая втулка или набор калибрующих пластин. Непосредственное охлаждение экструдата водой интенсифицирует процесс образования твердой гладкой корки, толщина коркового слоя обычно невысока и составляет примерно 0,1 мм, а качество поверхности изделия несколько хуже, чем у изделий, полученных по методу *Celuka*. Американский способ более доступен, так как он предусматривает исполь-

Таблица 7.37. Состав рецептур пено-ПВХ для производства профилей с плотностью 0,4–0,6 г/см³

Компонент	Функция компонента	Содержание компонентов в весовых частях профилей с плотностью, г/см ³	
		0,4–0,6	0,6–0,8
ПВХ суспензионный ($K = 55-60$)	Полимер-основа	100	—
ПВХ блочный, массовый ($K = 64-66$)		—	100
Двухосновной фосфит свинца	Стабилизатор, активатор	2,0	—
Стеарат кальция	Смазка	0,7	—
Стеариновая кислота	Смазка	0,4	—
Синтетический воск	Смазка	0,1	—
Оловоорганический стабилизатор	Стабилизатор	—	1,0–1,5
Модифицирующая добавка	Модификатор ударопрочности	—	10
Акрилатная добавка	Технологическая добавка	3–5	1–3
Двуокись титана	Краситель, светостабилизатор	3,0	—
Азодикарбонамид	Газообразователь	0,6	0,5–1,5

зование хорошо известного стандартного оборудования. Процесс позволяет получать профильные изделия сечением 0,5–4,50 см² со скоростью 3–12 м/мин [98].

Более подробно вопросы, относящиеся к оборудованию и технологической оснастке для производства пенопрофилей, рассмотрены в главе 8.

7.9.2.1. Композиции жесткого пено-ПВХ

Для получения высокого качества экструдированных профилей необходим тщательный подбор рецептуры пеноматериала.

Композиции, применяемые для производства профилей из пено-ПВХ с использованием химического метода вспенивания, состоят из полимера-основы, химического газообразователя (порофора), модифицирующих добавок, улучшающих технологические и механические свойства материала, стабилизаторов, активаторов, ускоряющих процесс разложения порофора, смазок, наполнителей и красителей. В настоящее время в связи с разработкой более эффективных газообразователей использование активаторов разложения стало необязательным.

В качестве газообразователя (порофора) чаще используют азодикарбонамид. Требования к составу композиций и свойства отдельных компонентов смеси рассмотрены в [98–105]. Примерный состав композиций для получения пенопрофилей из ПВХ приведен в табл. 7.37.

Смешение компонентов как и при приготовлении обычных композиций ПВХ осуществляется в двухстадийном турбоскоростном смесителе. Загрузка смесителя осуществляется поэтапно: сначала в горячий смеситель загружают твердые компоненты и на первом скоростном режиме их нагревают до 50 °С, после этого загружают жидкие компоненты и при втором скоростном режиме температуру повышают до 110 °С. Далее композицию выгружают в охлаждаемый смеситель, охлаждают до 50 °С, смешивают с порофором, активаторами, зародышеобразователями, стабилизаторами, пигментами, после чего готовая к переработке смесь направляется к экструдеру или на хранение в промежуточную емкость.

7.9.2.2. Особенности экструзии пено-ПВХ

Для получения качественных изделий с заданной степенью вспенивания и регулируемой толщиной поверхностной корки необходимо строгое согласование во времени нескольких физических процессов, происходящих в самом экструдере и на выходе из него [99, 102–104, 106–107].

Пластикация материала в экструдере должна начинаться при невысокой температуре, а заканчиваться прежде, чем произойдет разложение порофора; температурный профиль по длине экструдера устанавливается в зависимости от температуры разложения газообразователя, а время пребывания расплава в экструдере — в зависимости от кинетики вспенивания порофора.

Диапазон рабочих параметров переработки пено-ПВХ значительно уже, чем композиций ПВХ без порофора. В отличие от экструзии обычных композиций НПВХ при переработке пено-ПВХ повышение скорости вращения шнека или введение в смесь дополнительных количеств смазки приводит лишь к незначительному увеличению производительности. Разложение газообразователя начинается уже в каналах шнека, но высокое давление препятствует выходу газа и способствует его равномерному растворению в расплаве полимера.

При экструзии вспенивающихся композиций температура цилиндра в направлении к головке увеличивается, например, со 145 до 160 °С, в адаптере и головке несколько снижается — до 150 °С. Давление на входе в головку составляет примерно 200 атм, увеличение давления приводит, как правило, к получению профилей с мелкими равномерно распределенными ячейками.

Увеличение температуры в головке позволяет получать экструдат с гладкой поверхностью вместо шероховатой. Однако чрезмерное повышение температуры приводит к неустойчивому течению расплава из-за его прилипания к стенкам рабочих каналов и может вызвать разложение материала.

Возникающие при экструзии пенопрофилей дефекты, их причины и способы устранения приведены в табл. 7.38.

7.9.3. Пенополиэтилен

По величине кажущейся плотности пенополиэтилен делят на две категории: высоко-вспененный и частично вспененный (подвспененный). Высоковспененным полиэтиленом считается пенопласт, имеющий кажущуюся плотность менее 0,1 г/см³, а подвспененным — с плотностью 0,4–0,6 г/см³. Профильные изделия относят к категории подвспененных.

Таблица 7.38. Возможные проблемы при экструзии профилей из пено-ПВХ, их причины и способы устранения

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
<i>Нарушения плотности и структуры материала профиля</i>		
Повышенная плотность при гладкой поверхности	Низкая температура материала; неудовлетворительный состав композиции	Повышение температуры материала предпочтительно термостатированием шнеков, корректировка состава композиции
Повышенная плотность при шероховатой поверхности	Плохое скольжение по рабочим поверхностям головки; преждевременное вспенивание	Регулирование температуры головки, термостатирование шнеков; корректировка температуры расплава
Повышенная плотность, волнистая поверхность	Низкая температура материала; избыток смазки	Подбор температуры расплава; уточнение количества смазки в композиции
Крупные пузырьки и полости в массе профиля	Плохая свариваемость потоков расплава в экструдере; преждевременное разложение порофора; избыток смазки в композиции	Повышение давления в цилиндре и головке экструдера; корректировка рецептуры смеси
Неодинаковая плотность по сечению профиля; повышенная плотность материала в углах и кантах профиля	Неравномерность потоков расплава в головке	Доводка головки; снижение сопротивления течению материала в местах головки, где оформляются углы
Различие плотности в продольном направлении	Малое давление материала в экструдере, пульсация производительности экструдера	Повышение давления в экструдере; ингибирование вспенивания
<i>Ухудшение качества поверхности</i>		
Шероховатость и разрушения поверхности экструдата при низких температурах материала	Плохое скольжение расплава по стенкам рабочих каналов головки; неомогенность расплава	Повышение температуры в цилиндре и головке экструдера, увеличение длины шнека
Шероховатость и разрушение поверхности экструдата при высокой температуре расплава	Повышенная термическая нагрузка на материал; преждевременное газообразование; интенсивное вспенивание	Снижение температуры, уменьшение числа оборотов шнека; его термостатирование; ингибирование вспенивания
Матовая поверхность	Низкая температура формующего инструмента; недостаток внешних смазок в композиции	Повышение температуры головки; корректировка количества смазок в рецептуре

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Глянцевая поверхность	Избыток внешних смазок; повышенная температура расплава; калибратор слишком приближен к головке	Корректировка рецептуры композиции; снижение температуры расплава, увеличение расстояния между калибратором и головкой
Волнистая поверхность	Температурная неомогенность расплава	Увеличить сопротивление головки; удлинить шнек; повысить температуру расплава
Пористость поверхности	Повышенные размеры пор	Снизить температуру головки; уменьшить расстояние между калибратором и головкой; увеличить интенсивность охлаждения калибратора
Щероховатые полосы на поверхности	Загрязнение поверхности рабочих каналов головки; наличие отложений из материала на мундштуке; температурная неомогенность расплава	Обработка поверхности рабочих каналов головки; применение шнеков большей длины
Рваные кромки и разрывы канта	Застой материала в канале головки, оформляющем кант; загрязнение поверхности канала головки; повышенная степень вытяжки экструдата; низкая температура расплава	Полировка поверхности канала головки; пригнать сопряженные поверхности головки; снизить степень вытяжки экструдата; повышение температуры головки на выходе
Щероховатость одной из сторон профиля	Температурная неомогенность расплава; неравномерность потоков расплава в головке	Обработать поверхности каналов головки; повысить температуру головки; корректировка формы канала

Свойства пенополиэтилена в большой мере определяется способом приготовления композиции и природой газообразователя. В качестве газообразователя используют азодикарбонамид.

Одним из способов приготовления полиэтиленовых композиций является опудривание в смесителе гранул полиэтилена тонкодисперсным порошком газообразователя. Для лучшей адгезии порофора к гранулам в композицию добавляется небольшое количество трансформаторного масла. Существуют и другие способы приготовления композиций, но всем им присущи существенные недостатки, главными из которых являются невозможность длительного хранения композиции из-за способности порофора поглощать влагу и неравномерность распределения порофора, в результате чего не удастся получить равномерной структуры пенополиэтилена. Способ, лишенный указанных недостатков, освоен на Полоцком химическом комбинате (Беларусь). Он основан на введении порофора в полиэтилен, находящийся в вязкотекучем состоянии, с последующим гранулированием композиции [108].

Таблица 7.39. Свойства пенополиэтилена высокой плотности

Характеристика	Пено-ПЭ	Монолитный ПЭВП
Кажущаяся плотность, г/см ³	0,55	0,96
Разрушающее напряжение, МПа:		
при растяжении (вдоль корки)	7,0	21–35
при сжатии (поперек корки)	4,9	17
при сдвиге	8,3	21
при изгибе	12,0	36
Модуль упругости при изгибе, МПа	670*	1050
Коэффициент термического расширения, 1/°C:		
вдоль корки	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
поперек корки	$3 \cdot 10^{-5}$	–

* Данные относятся к толщине изделий вдвое меньшей, чем для монолитных изделий.

Экструзионные методы получения интегральных пенопластов позволяют получать профилированные изделия толщиной до 5–30 мм. Легкость регулирования плотности и толщины изделий из интегрального полиэтилена позволяет в широких пределах варьировать свойства конечных изделий. Следует отметить, что при одинаковой массе жесткость интегральных изделий в 3,4 раза выше жесткости монолитных пластиков [93, 108]. В табл. 7.39 приведены свойства интегрального пенопласта на основе ПЭВП в сравнении с монолитным материалом.

При переработке пенополиэтилена температурный режим по зонам цилиндра устанавливают с расчетом постепенного подъема температуры до разложения газообразователя и вспенивания полимера на выходе из головки. Вязкость расплава композиции должна поддерживаться на определенном уровне: повышенная вязкость приводит к высокой плотности в изделии, а низкая дает шероховатую неровную поверхность.

Для получения мелкоячеистой структуры необходимо применять оптимальное количество газообразователя. Малое количество порофора не обеспечивает необходимую степень вспенивания, избыток (более 1%) — нарушает однородность ячеистой структуры.

Для ПЭНП можно привести следующие параметры процесса экструзии [108]:

- время пребывания материала в экструдере — не менее 6 мин;
- температура по зонам цилиндра экструдера, °C:
 - в зоне загрузки 145–150;
 - в зоне выдавливания 145–150;
 - корпус головки 155;
 - фильера 180;
- содержание порофора — 1% (4,4-окси-бисбензолсульфонилгидразид-порофор ОВ);

- начальная плотность материала — $0,92 \text{ г/см}^3$;
- конечная плотность материала — $0,37 \text{ г/см}^3$;
- степень вспенивания — $2,50$;
- газовое число — $160 \text{ см}^3/\text{г}$.

Степень вспенивания примерно обратно пропорциональна скорости вращения шнека при заданной температуре. Частота вращения шнека является наиболее быстрым и эффективным средством воздействия на скорость и степень разложения газообразователя. Оптимальную скорость вращения шнека подбирают путем измерения плотности продукта. При переработке пеноматериалов необходим тщательный контроль температуры, особенно в зоне дозирования и на входе в головку: если плотность изделия с возрастанием скорости шнека увеличивается, то температура экструзии либо мала, либо соответствует норме; если же при возрастании частоты вращения шнека плотность падает, а качество вспенивания ухудшается, то температура расплава слишком высока, особенно в цилиндре.

7.9.4. Пенополистирол

Для производства профильных изделий пенополистирол применяется редко и в небольших количествах.

В качестве газообразователей в композициях на основе полистирола используют азодикарбонамид, 4,4-оксибис (бензолсульфонилгидразид) в количестве $0,1-2\%$, *n*-толуолсульфонилсемикарбазид ($0,1-5\%$), тринитразинотриазид ($0,1-5\%$), иногда смесь гидрокарбоната натрия и лимонной кислоты в соотношении $1:1$ [93].

Вводят порофор в композицию одним из следующих методов:

- 1) смешением порошкообразного газообразователя (или его концентрата) с гранулами полистирола с антиадгезионной добавкой (бутилстеарат, низкомолекулярный полиизобутилен) в низкоскоростной мешалке;
- 2) непосредственным введением порофора в расплав при температуре ниже температуры разложения газообразователя. Одновременно этими же способами вводят и другие добавки: красители, наполнители, пластификаторы.

В качестве основного экструзионного метода получения интегральных пенополистирольных профилей используется метод *Celuka* и его модификации, позволяющие изготавливать любые профили толщиной $4-50 \text{ мм}$ и полые секции для нужд строительства и мебельной промышленности. Интегральные пенополистиролы можно экструдировать на обычных экструдерах при их незначительной модификации: необходимо устройство для тщательного перемешивания и диспергирования порофора, шнек экструдера должен иметь степень сжатия не менее $2,5:1$ [93].

Температура головки экструдера обычно на несколько градусов ниже $T_{\text{разл}}$ полистирола, в результате чего уже на выходе из мундштука изделие имеет достаточно стабильную форму.

В табл. 7.40 приведены параметры процесса экструзии при получении профилей из пенополистирола общего назначения и пено-АБС.

В зависимости от метода получения, состава композиции, формы и размеров изделий свойства интегральных пенополистиролов меняются в широких пределах [93–95].

Таблица 7.40. Параметры процесса экструзии профилей из пенополистирола и пено-АБС

Технологический параметр	ПС	АБС
Температура по зонам цилиндра экструдера, °С:		
зона загрузки	160	165
зона плавления	205	195
зона выдавливания	210	205
Температура по зонам головки, °С:		
корпус	210	205
фильера	195	185
Частота вращения шнека, об/мин	40	30
Содержание порофора, масс. %	0,20	0,35
Плотность изделия, г/см ³	0,60	0,62

Таблица 7.41. Свойства экструзионных интегральных пенопластов [93]

Свойства	ПС	ПС ударопрочный	ПВХ	ПВХ ударопрочный	ПЭП	Древесина (пихта)
Кажущаяся плотность, г/см ³	0,45–0,55	0,5–0,6	0,4–0,7	0,4–0,7	0,45–0,70	0,50
Модуль эластичности при изгибе, МПа	1400–1600	1100–1400	1400–1800	450–550	450–500	10 000
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	8–10	8–10	4–5	2,5–3,0	3,5–4,5	45,6
Коэффициент линейного термического расширения, 1/(°С · 10 ⁻⁵)	6–7	6–7	5–6	7–8	11–12	–
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	0,053	0,058	0,047	0,050	0,099	0,350

Интегральный пенополистирол — горючий материал, обладающий «напалмовым эффектом». Скорость распространения пламени в несколько раз превышает тот же показатель для других пенопластов [93]. Верхний предел его рабочих температур эксплуатации определяется составом композиции и не превышает 70–80 °С. Однако уже при 40 °С рекомендуется снижать вдвое максимально допустимые нагрузки. В табл. 7.41 приведены для сравнения свойства интегральных пенопластовых профилей из различных материалов.

7.9.5. Другие пенопласты

Пенопласты могут быть изготовлены на основе практически любых термопластов, но необходимость в этом определяется экономическими соображениями. Другие пено-

зуемых или малоиспользуемых наполнителей. Были созданы специализированные институты, занимающиеся этой проблемой, которая оказалась не такой простой, как ее сначала представляли, и совсем не дешевой.

Основной упор при наполнении делали на минеральные наполнители, но оказалось, что при малом наполнении экономический эффект совсем небольшой и наблюдается повышенный износ оборудования, а при большом возникают проблемы с переработкой и ухудшением качества изделий.

Известно, что при наполнении возрастают твердость, прочность, снижаются термическая усадка и термическое расширение, но снижаются также эластические свойства, возрастает хрупкость материала и возникают другие нежелательные эффекты, ухудшающие свойства полимеров.

7.10.1 Достижения

Проблема наполнения не забыта, ею продолжают заниматься и в наше время. Например, одним из видов наполнителей может быть резиновая вулканизованная крошка, получаемая при переработке изношенных автомобильных шин и других резино-технических изделий. Наполнение ПЭВП и ПП частицами резины приводит к нежелательному охрупчиванию материала. Исследовано деформационное поведение наполненных ПЭВП и ПП при предельно высоких степенях содержания резиновой крошки, достигающих 95% по объему. В области степеней наполнения 10–50% наполненные композиты разрушаются хрупко. При содержании наполнителя примерно 60% наблюдается хрупкопластичный переход механизма деформирования, вследствие чего композит вновь становится пластичным. При сверхвысоких степенях наполнения непрерывной фазой является термопластичный полимер. Несмотря на это, композит деформируется обратимо подобно сшитому каучуку.

На основе результатов исследования разработана технология получения гидроизоляционных и кровельных материалов на основе вторичных полиолефинов и дисперсных продуктов переработки шин. В качестве матрицы используются бытовые отходы смесей ПЭНП и ПЭВП, что позволяет решить соответствующую экологическую проблему утилизации полимерного сырья. За разработку данного материала, названного резинопластом, получена Золотая медаль и диплом на Международной выставке в Женеве [109–112]. Кроме кровельных материалов резинопласт, вероятно, может использоваться и в других областях, в том числе и для изготовления профильных изделий.

Расширяется использование природных минеральных наполнителей. Так, в Сибири в Иркутском институте органической химии разработан проект использования природных силикатов и алюмосиликатов для наполнения ПВХ [113]. По стойкости к абразивному износу обычные пластикаты, наполненные природными силикатами типа диоксида молотого, превосходят половую плитку некоторых западных фирм. По теплостойкости, степени наполнения, стойкости к абразивному износу, электроизоляционным свойствам, способности к переработке наполненные пластикаты превосходят все традиционные отечественные композиции на основе полимеров винилхлорида, наполненные мелом.

Новый повышенный интерес к наполнению возник после разработки в 90-х гг. прошлого века Австрийским институтом агробиотехнологии новой революционной

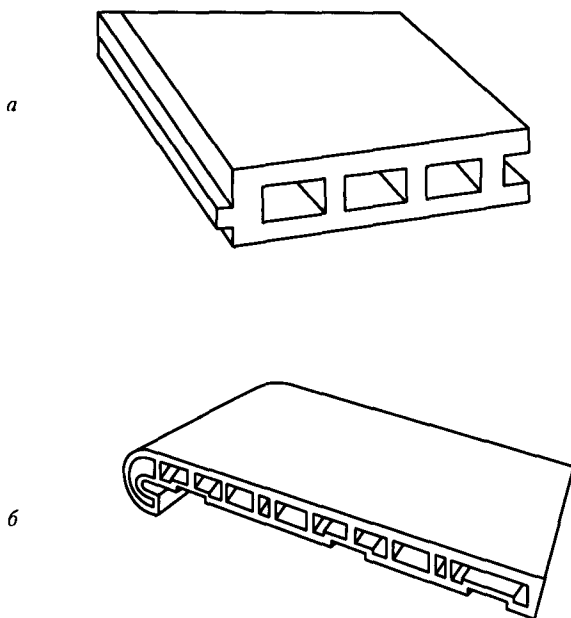


Рис. 7.18. Образцы шпунтованной доски (а) и подоконника (б), изготовленных по технологии «жидкое дерево» [118]

технологии производства профильных изделий строительного назначения. Эта технология условно названа «жидкое дерево», поскольку представляет собой переработку высоконаполненных композиционных материалов на основе древесных волокон [114–117].

Сырье, названное *FASALEX*, содержит 70–75% древесных волокон и синтетических материалов и 25–30% добавок. Древесные волокна являются главным компонентом смеси, а не наполнителем [117]. Для того чтобы иметь возможность перерабатывать древесные волокна, к ним с большой точностью по вязкости подбирают термопластичную матрицу — полипропилен, полиэтилен, поливинилхлорид. Для хорошего совмещения синтетических и природных органических компонентов в состав смеси вводят необходимые добавки. Готовый к переработке гранулят с плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ и размером частиц 3–5 мм имеет влажность 4–6%, которая играет роль технологической добавки для улучшения переработки. Оптимальное диспергирование предотвращает фракционирование компонентов при переработке и концентрацию полимера в поверхностных слоях изделия. Специальной сушки гранулята с такой остаточной влажностью не требуется.

Профили из древесных волокон нельзя сравнивать по их свойствам с профилями на базе ПВХ, ПП или вспененных термопластов. Скорее, их следует рассматривать как заменитель профиля МДФ, в особенности там, где имеется избыток опилок, получаемых в результате механической обработки древесины. На рис. 7.18 приведены схемы образцов подоконника и шпунтованной доски, изготовленных компанией *Technoplast*.

Из шпунтованных досок (см. рис. 7.18, а) можно строить даже дома. Твердость экструдированного профиля составляет 8000 Н/мм^2 — такая же, как у тикового дерева, одной из самых твердых пород дерева в мире. Кроме того, из высоконаполненных смесей можно изготавливать столешницы шириной до 1000 мм, кабельные короба, трубы, отделочные доски, облицовочные панели, оконные и дверные рамы, стойки. В настоящее время разработаны и испытаны многокамерные оконные профили *Ekutherm*, экструдированные из состава *Fasalex*, теплотехнические и физико-механические характеристики которых намного превосходят как традиционные деревянные окна, так и деревянные окна «улучшенной» конструкции с заполнением стеклопакетами. По мере более широкого распространения описываемой технологии стоимость *Fasalex*-профилей будет снижаться, в том числе и за счет использования местного сырья и отходов. В США, где эта технология очень популярна и широко используется, строительные доски, полученные из «жидкого дерева», применяются для изготовления настилов пирсов и причалов. Это позволяет отказаться от традиционных деревянных досок, которые приходится менять каждые пять лет [114, 115].

Введение в состав композиции антипиренов и антисептиков предотвращает возгораемость и гниение изделий, от чего не застрахованы обычные деревянные изделия даже при самой тщательной специальной обработке. Защищенные от влаги и возгорания строительные пустотелые профили являются идеальным средством для прокладки разнообразных проводов; профили можно соединять с помощью специальных замков, являющихся частью профиля, что сокращает и удешевляет строительство. Торцы пустотелых профилей при монтаже конструкций должны быть плотно закрыты специальными пластмассовыми заглушками.

При аккуратном обращении с новым строительным материалом его можно использовать многократно, так как раскрыть пластмассовый замок, специально приспособленный для многократного использования, не составит особого труда.

Созданный на базе древесных волокон материал имеет невысокую прочность на удар, что для переработчиков пластмасс является серьезным недостатком, но позволяет непрерывно изготавливать профили сложной формы при большой экономии древесины, что привлекательно для деревообрабатчиков. Поэтому повышение интереса к созданной технологии и возможностям ее применения следует ожидать именно со стороны деревообрабатывающей промышленности.

Смеси с содержанием 40–70% древесных волокон имеют меньшую жесткость по сравнению с высоконаполненными из-за увеличения доли полимера, а также меньшую гигроскопичность и повышенную ударную вязкость, однако по сравнению с аналогичными ПВХ-профилями требуется некоторое увеличение толщины стенок.

Достаточно высокая жесткость, почти такая же, как у пластмассовых профилей, делает возможным изготавливать изделия сложной геометрии: облицовки балконов и фасадов домов, поручни, различного рода ограждения, напольные покрытия и т. д.

7.10.2. Оборудование

Приготовление композиции осуществляется в специальном экструдере-грануляторе, в который загружают компоненты смеси.

При использовании обычного двухшнекового экструдера гранулирование не проводят, а экструдировать гомогенную массу через специальный формующий инструмент для дальнейшего калибрования, отвода и резки.

При выборе конструкции экструдера необходимо учитывать остаточную влажность в материале, насыпной вес и сыпучесть композиции, развиваемое при экструзии давление.

Чем выше влажность, тем больше требуется времени для ее удаления. Стандартные экструдеры, которые обычно применяются в производстве полимеров, имеют относительно небольшие отверстия для дегазации, что при повышенных оборотах усложняет удаление влаги. Чем выше влажность материала, тем ниже производительность.

Экструдеры для переработки древесно-волоконистых композиций имеют специальные большие отверстия цилиндрической формы для дегазации расплава.

Небольшой насыпной вес древесной смеси и композиций на ее основе обуславливает низкую производительность стандартных шнеков, используемых при переработке НПВХ. Геометрия специальных шнеков предусматривает больший объем поступающего сырья с насыпным весом 200–400 г/л [117].

Давление массы при производстве профилей из *Fasalex* находится в пределах 200–300 бар; при экструзии небольших профилей и применении некоторых рецептов сырья давление может достигать 400 бар и выше. Небольшие скачки давления, однако, могут вызвать аварийное отключение экструдера, рассчитанного на передачу определенного крутящего момента, что, в свою очередь, может повлечь за собой демонтаж экструзионного инструмента и шнеков. Чаще всего это происходит, когда наблюдаются колебания влажности приготовленной смеси. Именно в этом случае большую роль играют известные особенности конических экструдеров по сравнению с параллельными: высокое давление массы может уменьшаться в области расположения упорных подшипников из-за большого расстояния между осями шнеков; упрощенная процедура демонтажа конических шнеков обеспечивает высокую гибкость производства, в том числе и при обычной остановке экструдера. Конические шнеки обеспечивают высокую степень сжатия, равномерность прогрева и одинаковое для всех слоев материала время пластикации.

Для производства изделий из древесноволокнистых материалов требуется специальная оснастка. Многообразие состава рецептов позволяют работать при невысокой производительности на уже имеющемся оборудовании, но для экономически оправданного производства необходим соответствующий экструдер со специальными шнеками для переработки высоконаполненных композиций.

Дальнейшим усовершенствованием разработанного состава *Fasalex* явилась технология получения древесного наполнителя в виде коротких волокон, которую разработала фирма *JRS*. Для композиции используются короткие древесные волокна длиной 90, 120, 300 мкм преимущественно мягких хвойных пород дерева, что визуально представляет собой древесную муку. Кроме древесной муки в состав смеси входят также отходы сельскохозяйственных культур: в США это большей частью стебли кукурузы, сахарного тростника, риса; подходят и другие культуры — подсолнечник, конопля, лен [115].

Отходы деревообработки дробятся на ножевых и молотковых дробилках, измельчаются на мельницах тонкого помола, на валковых машинах и дезинтеграторах, пос-

ле чего материал просеивается и фракционируется. Конечный продукт известен под торговой маркой *LIGNOCEL*.

При приготовлении композиции и последующей переработке в изделия важно сохранить содержание влаги в древесных волокнах не ниже 1–3%, так как при этом теряется их гибкость, и вследствие этого ухудшаются свойства профиля.

В мае 2000 г. в Вене по инициативе фирм *Cincinnati Extrusion, JRS, Fasalex, PPT* состоялся симпозиум, посвященный технологии экструзии этого материала, на котором присутствовали представители более чем из 20 стран [116]. На симпозиуме, кроме уже известного *Fasalex*, был представлен и новый материал под названием *TECH-WOOD* (разрабатываемый фирмой *TECH-WOODO/NL*), который состоит из натуральных древесных волокон (обычно сосны) определенного размера в количестве до 75% массы и полимерного связующего (чаще ПП). Плотность готового продукта около 1,1 г/см³. Опилки предварительно высушиваются и смешиваются с добавками до образования однородного агломерата. Остаточное содержание влаги в композиции составляет менее 1%. Готовые профили отличаются высокой механической прочностью, а также стойкостью к атмосферным воздействиям. Материал не теряет своих свойств в течение 3–4 циклов переработки.

Для самостоятельного приготовления сырья по технологии *TECH-WOOD* требуется станция для приготовления композиции, куда входят сушилка для опилок и смеситель. Переработка материала производится на специально для этого метода разработанных машинах. Большая скорость экструзии профилей возможна только при минимальном содержании влаги в материале. Профили с толщиной стенок не менее 2 мм обладают повышенной жесткостью; поверхность изделий устойчива к воздействию влаги и солнечных лучей. При использовании простых рецептов и древесных волокон с большим содержанием влаги (8–9%) производительность оборудования ниже. Производитель профилей сам оптимизирует рецептуру смеси в соответствии со своими требованиями к конечному продукту. Примерный состав композиций: древесные опилки — 50–70%, синтетические материалы — 50–60% ПВХ или 30–40% ПП [117]. Рекомендуется подсушка волокон до остаточной влажности не более 8% и гранулирование, поскольку насыпной вес, как правило, слишком мал.

Для промышленного производства гранулированных материалов с повышенной влажностью подойдет экструдер с несколькими дозирующими устройствами для подачи отдельных компонентов. Успех предприятия по использованию данной технологии самостоятельно без покупки ноу-хау и помощи разработчика материала зависит от опыта и знаний в подготовке наполнителя и в разработке качественных композиций материалов. При экструзии температура в цилиндре экструдера в зависимости от состава и соотношения компонентов смеси должна составлять 150–170 °С, в зоне загрузки состава — 90 °С, на головке — 160–170 °С.

Важным отличием переработки высоконаполненных составов является высокая формоустойчивость экструдата. Роликовое калибрующее устройство служит скорее для сохранения уже сформованного в головке профиля, чем для придания ему конечной формы путем пластического деформирования.

В зависимости от диаметра шнеков и размеров экструдировемого профиля производительность установок колеблется от 80 до 600 кг/ч.

Профили из древесноволокнистых материалов можно декорировать всеми известными способами: фанеровать шпоном, ламинировать пленками и листовыми пластиками, красить любыми красками и лаками. Механическая обработка профилей такая же, как и для традиционных профилей (резка, сверление, шлифовка).

Пока технология переработки высоконаполненных материалов широко используется только в США, но с каждым годом она все более распространяется в странах Европы. По-видимому, самый перспективный рынок экологически чистого материала сформируется в Японии, где все чаще возникают сомнения по поводу безопасности применения ПВХ и других пластиков в жилищном строительстве; проявляют интерес к этой технологии и в России. Пока же те предприятия, которые собираются заниматься производством таких наполнителей или переработкой порошкообразных составов, должны учесть токсическое и аллергенное воздействие некоторых растений на организм человека, а также повышенную пожаро- и взрывоопасность подобных цехов [116].

Другой областью применения высоконаполненных древесно-полимерных материалов (ЛДПМ) является производство листовых рулонных материалов. Листы из ЛДПМ изготавливаются методом экструзии из гранулированного полипропилена и древесной муки (опилок) с одновременным каландрированием. Листы являются влагонепроницаемым, экологически чистым материалом, не подверженным действию грибков, нейтральным по отношению к большинству химических соединений. ЛДПМ легко поддается термо- и вакуум-формовке, штамповке и обрабатывается всеми видами инструментов. Может быть использован в транспортном машиностроении для внутренней отделки салонов трамваев, троллейбусов, автобусов, в судостроении и самолетостроении, в строительстве (панели, потолки, шкафы, балконы), в промышленности (в качестве конструкционного и отделочного материала), в производстве мебели (замена ДВП, ДСП, фанеры), в наружной рекламе и других отраслях. Температура эксплуатации изделий из ЛДПМ от -40 до $+120$ °С. Предприятие, специализирующееся на производстве ЛДПМ (ООО «Технолист»), изготавливает его на основе ПЭНП, ПЭВП, ПП и резинопласта [120].

Продолжаются также поиски в области использования полимерных отходов. В Голландии разработан новый экструзионный компаунд на основе стандартных марок полиэтилентерефталатов и проведены успешные испытания по экструзии из этого материала оконных профилей на стандартных одношнековых экструзионных линиях [119]. Независимые эксперты признали полученные профили вполне удовлетворяющими требованиям к аналогичным оконным ПВХ профилям. В стадии разработки находится рецептура смеси, в состав которой входит измельченный ПЭТФ из бутылок, которые в любой стране сейчас загромождают городские свалки.

7.11. Термоэластопласты

Термоэластопласты (ТЭПы) — полимерные материалы, обладающие при эксплуатации свойствами эластомеров (резин) и перерабатываемые как обычные термопласты. Изделия из ТЭПов находят все большее применение при производстве различных уплотнителей, мягких, полужестких и теплостойких трубок, товаров для быта.

Рост производства ПВХ-окон вызвал увеличение спроса и производства уплотнительных профилей для них. Используемые уплотнители из некоторых видов резин и пластифицированного ПВХ имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение:

- профили из эластомеров практически не имеют остаточных деформаций, что позволяет успешно использовать их практически везде, где требуется хорошая герметичность стыков, в том числе и при работе в тяжелых условиях (для уплотнения фасадов зданий и стыков крыш), но они значительно более подвержены старению, чем пластмассовые;
- в уплотнительных профилях из поливинилхлоридного пластика изменение эксплуатационных характеристик происходит либо в результате потери (десорбции) пластификатора, либо в результате термодеструкции; оценку степени старения определяют, как правило, по изменению каких-либо характеристик механических свойств: разрушающего напряжения при растяжении, относительного удлинения при разрыве, прочности на удар, восстанавливаемости после сжатия в течение некоторого времени;
- на практике полимерные изделия работают в основном при деформации 10–20%, и важнейшим требованием при этом является сохранение формы изделия после снятия нагрузки; в результате потери пластификатора изделие частично теряет эластичность (резиноподобность), становится более жестким, возрастает доля пластической деформации; с увеличением температуры эксплуатации интенсивность процесса потери пластификаторов возрастает, к тому же начинают влиять процессы термодеструкции, которые при высоких температурах доминируют и оказывают наибольшее влияние на старение полимера.

Возрастающий спрос на изделия из ТЭПа обусловлен свойствами этого класса материалов. ТЭПы представляют собой блоксополимеры с жесткими (например, полиэтиленовые, полистирольные, поливинилхлоридные, полиакрилатные) блоками и гибкими эластомерными блоками (полибутадиеновые, полиизопреновые, этиленпропиленовые и др.) [121–122]. Термоэластопласты обладают прочностью и эластичностью вулканизованных резин, но при переработке не требуют проведения вулканизации, что значительно упрощает производство изделий и сокращает затраты на этот трудоемкий процесс. Поэтому стоимость изделий из ТЭПа ниже стоимости изделий из резины.

Изделия из термоэластопластов характеризуются высокой стойкостью к истиранию, действию озона, минеральных масел, высокой прочностью при растяжении и сравнительно большим относительным удлинением. Изделия из ТЭПов могут применяться в диапазоне температур от -45 до $+130$ °С. Перспективно также применение ТЭП в качестве модификаторов термопластов и каучуков.

7.11.1. Виды и свойства ТЭП

Существует много видов термоэластопластов, из них самые распространенные — на основе *EPDM* каучука и полипропилена, на основе ненасыщенных полиэфиров, на основе стирольных блок-сополимеров. Свойства композиций ТЭП зависят от соот-

Таблица 7.43. Механические свойства некоторых термоэластопластов [123]

Тип ТЭП	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Шору
Полистирол-полиизопрен-полистирол	32	1110	66
Полистирол-полибутадиен-полистирол	31	880	72
Полисульфон-полисилоксан-полисульфон	21	700	80

Таблица 7.44. Свойства ТЭП по ТУ 2243-154-00300209-01 [124]

Вид	Марка/Твердость			
	А/50–55	Б/55–60	В/60–65	Г/более 65
1	Условная прочность при разрыве, МПа, не менее			5,0
	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее			500
	Сопrotивление многократному изгибу, циклы, не менее			30000
	Прочность склеивания с тканью, кН/м, не менее			2,7
	Показатель текучести расплава ПТР, г/10 мин			20–50
2	Условная прочность при разрыве, МПа, не менее			4,0
	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее			450
	Сопrotивление многократному изгибу, циклы, не менее			25000
	Прочность склеивания с тканью, кН/м, не менее			2,7
	Показатель текучести расплава ПТР, г/10 мин			20–50
3	Условная прочность при разрыве, МПа, не менее			3,0
	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее			350
	Сопrotивление многократному изгибу, циклы, не менее			15000
	Прочность склеивания с тканью, кН/м, не менее			2,7
	Показатель текучести расплава ПТР, г/10 мин			15–80
4	Условная прочность при разрыве, МПа, не менее			2,5
	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее			250
	Прочность склеивания с тканью, кН/м, не менее			2,7

ношения компонентов, составляющих смесь. В табл. 7.43 приведены характеристики механических свойств некоторых видов ТЭП.

Отечественной промышленностью выпускаются некоторые типы ТЭП-композиций, например, на основе дивинилстирольных каучуков и полистиролов по ТУ 2243-154-00300209-2001. Кроме полимеров композиции содержат мягчители, наполнители, порообразователи (для вспенивающихся композиций) и другие ингредиенты. Композиции выпускаются в гранулах с размерами от 2 до 10 мм. Их разделяют по твердости, которой соответствует несколько марок, и по прочностным показателям, в зависимости от которых они разделяются на несколько видов. В табл. 7.44 представлены свойства ТЭП на основе стирола и дивинилстирольного каучука.

Композиции ТЭП горючи: при поднесении открытого пламени они загораются без взрыва и горят коптящим пламенем с выделением стирола и окиси углерода. При нормальных условиях при непосредственном контакте не оказывает вредного влияния на организм человека.

В ОАО «Уралхимпласт» разработана новая группа термоэластопластов под торговой маркой Тэфлекс, представляющих собой модифицированные специальными добавками компаунды на основе поливинилхлорида и различных видов каучуков [125]. Новые материалы могут быть использованы в качестве альтернативы таким полимерам, как резина, полиуретаны, EPDM. Различные марки термоэластопластов Тэфлекс предназначены для производства подошвы и верха обуви, различных видов уплотнительных профилей (автомобильного, дверного, оконного, строительного), а также для уплотнения холодильных камер. Каждая марка материалов Тэфлекс обладает набором свойств, зависящих от области применения.

Термоэластопласты в отличие от традиционно используемых материалов (например, резины), более технологичны, их производство менее трудоемко. Стоимость некоторых марок Тэфлекса примерно в 1,5–2 раза меньше импортных аналогов. Новые термоэластопласты не содержат свинцовых стабилизаторов и других тяжелых металлов, поэтому Тэфлекс более экологичен. Другим положительным свойством новых ТЭП является пониженная миграция пластификатора.

В последние годы термоэластопласты все более широко применяются для изготовления силовых шланговых кабелей. Это связано как с их свойствами, близкими к свойствам резин, так и с возможностью переработки на обычном экструзионном оборудовании без вулканизации. В табл. 7.45 приведены физико-механические и электрические показатели отечественных композиций по ТУ 2243-003-21346056-97.

Для оценки свойств ТЭП, разработанных для кабелей, были проведены исследования термостойкости: температур начала разложения, начала перехода в вязкотекучее состояние, начала окисления [126]. Исследования проводились методами термогравиметрического и термомеханического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. В результате установлено, что температура начала активного окисления материала составляет 220 °С, а температура деструкции — 324 °С. Максимальная температура переработки композиции должна находиться в пределах 200–220 °С.

Материал является частично кристаллическим полимером. Деформация материала под нагрузкой начинает проявляться при нагревании выше 60 °С, при температуре выше 110 °С происходит переход ТЭПа в вязкотекучее состояние. Это соответствует его теплостойкости не менее 90 °С.

Еще одну новую группу ТЭП составляют динамические термоэластопласты (ДТЭП) голландской фирмы *Sarlink* (ДСМ-эластомеры) и американской фирмы *AEC* (Сантопрен). Распространением этого типа ТЭП в России активно занимается ООО «Ан-Кер» [128, 129].

ДТЭП обладает свойствами как вулканизированной резины, так и конструкционными свойствами термопластов. Изменением соотношения каучуков и термопластов, используемых для изготовления ДТЭПов, можно добиться в изделиях из них нужных показателей в диапазоне от резины до пластмассы, что позволяет исключить хрупкость изделий. Особые качества материала делают его полностью пригодным для вторичной переработки. Простота переработки, эластичность ДТЭП являются

Таблица 7.45. Свойства ТЭП ЭП-17 и ЭД-17 [126, 127]

Наименование показателей	Норма		Методы испытаний
	Марка ЭП-17*	Марка ЭД-17**	
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	7,0	6,0	ГОСТ 11272-80
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	400	300	ГОСТ 11272-80
Ускоренное тепловое старение:			ГОСТ 9.024-74
при 100 °С, 96 ч, не менее	$s = 6,0; g = 280$	$s = 5,0; g = 210$	
при 120 °С, 96 ч, не менее	$s = 3,5; g = 200$	$s = 3,0; g = 130$	
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · см, не менее	$1 \cdot 10^{13}$	—	ГОСТ 6433.2-71
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более	0,03	—	ГОСТ 22372-77
Диэлектрическая проницаемость, не более	3,0	—	ГОСТ 22372-77
Электрическая прочность, Мв/м, не менее	22	20	ГОСТ 6433.3-71
Температура хрупкости, °С, не выше	–40	–40	По п. 4.12 ТУ
Эластичность по отскоку, ед.	40–60	40–60	Стандарт СЭВ 108, п. 4.15
Технологичность	Отсутствие пор в образцах		
Потеря массы при сушке, %, не более	0,3	0,3	ГОСТ 19338-90
Индекс расплава, г/10 мин, $T = 190$ °С, $P = 5$ кг	2–4	5–8	ГОСТ 11645-73
Разброс по индексу расплава в пределах одной партии, %, не более	12	—	По п. 4.4 ТУ
Плотность, г/см ³	1,0 + 0,05	1,0 + 0,05	ГОСТ 15139-69
Количество включений, шт., не более	15	—	По п. 4.6 ТУ

* ЭП-17 — изоляционная композиция; ** ЭД-17 — шланговая.

очевидными преимуществами материала для расширения ассортимента выпускаемой продукции и повышения долговечности ее эксплуатации.

ДТЭП имеют высокую стойкость к озону и ультрафиолетовому излучению, стойкость к химическому воздействию во многих агрессивных средах, широкий интервал температур эксплуатации. Изделия из ДТЭП имеют стабильно высокое качество, минимальные допуски на размеры изделий, низкую термическую усадку. Повышенная стойкость к ударным нагрузкам, выносливость к изгибу, в том числе многократному, высокая прочность при растяжении и сжатии расширяют области применения этого типа ТЭП. В настоящее время более 20% потребления эластомерных материалов за рубежом в автомобильной промышленности приходится на изделия из термоэластопластов динамической вулканизации (ДТЭП). Всемирно известные корпорации Мерседес-Бенц, БМВ, Крайслер, Мицубиси, Ниссан, Пежо, Рено, АвтоВАЗ активно

Таблица 7.46. Свойства ТЭП *Hytrel* [130]

Наименование материала	Краткая характеристика	Области применения
Hytrel 3548 Hytrel G-4774 Hytrel 7246	Цвет натуральный Повышенная стойкость к ударным нагрузкам Модуль упругости 400–2000 МПа Высокая химическая стойкость Теплостойкость до 80 °С Переработка методом литья под давлением и экструзии (для высоковязких композиций) на стандартном оборудовании	Уплотнения, шестерни, хомуты, мембраны и др.

наращивают объемы применения изделий из ТЭП типа «Сарлинк» и «Сантопрен» в производстве автомобилей, используя его для герметизация опускаемых окон автомобилей, в качестве наружных молдингов, уплотнителя крепления зеркала, для герметизация фар, изготовления уплотнения окантовки ветрового стекла, спойлера, в качестве противоударного амортизатора капота, для воздухоотводов, в качестве уплотнителя системы рамной безопасности, для герметизации радиатора, крышки багажника, неопускного окна, средней стойки. Соединение изделий производится сваркой или склейкой.

Одним из наиболее известных типов ТЭП являются термоэластопласты фирмы *DuPont* (США) под торговой маркой *Hytrel* на основе ненасыщенных полиэфиров. Это конструкционный материал с высокой усталостной прочностью, стойкостью к раздиру и ползучести, обладающий высокой прочностью на удар. Изделия из него сохраняют свойства в широком диапазоне температур. Материал легко перерабатывается методом литья под давлением и экструзией с раздувом. Для разных марок *Hytrel* твердость по Шору (шкала *D*) находится в диапазоне от 35 до 72. В табл. 7.46 приведены общие свойства этого вида ТЭП.

7.11.2. Применение

Как указывалось выше, основное применение мягких ТЭП — это уплотнители. ТЭПы, производимые ЗАО «Уралэластотехника» по ТУ 5775-011-00149279-2001, предназначены для изготовления уплотнителей к оконным и дверным блокам. Уплотнители работоспособны при температуре окружающего воздуха от -50 до $+80$ °С [131]. Гарантийный срок службы — не менее 10 лет. Виды выпускаемых уплотнителей и их размеры показаны на рис. 7.19. В табл. 7.47 представлены нормативные и фактические данные по свойствам уплотнителей, представленных на рис. 7.19. Уплотнители соответствуют государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам ГН 2.1.6.695-98 «ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».

Фирма «Барс-профиль» (Санкт-Петербург) производит уплотнительные профили «евроокно» и «елочка» для окон и дверей из стиролэтиленбутадиенстирольных (SEBS) термоэластопластов [132]. Диапазон работоспособности профилей от -70 до $+125$ °С.

Таблица 7.47. Свойства уплотнителей из ТЭП по ТУ 5775-011-00149279-01 [131]

Наименование показателя	Норма по ТУ	Фактические показатели
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	5,0	10,9
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	150	868
Температура хрупкости, °С, не выше	-45	-61
Остаточная деформация (при деформации сжатия 25% в течение 24 ч при $T = 70^\circ\text{C}$), %, не более	50	47,5
Изменение значения показателей после старения на воздухе в течение 24 ч при $T = 125^\circ\text{C}$, %, не более:		
прочность при растяжении	Снижение 25	Снижение 17,1
относительное удлинение при разрыве	Снижение 50	Снижение 6,2
твердость по Шору (шкала А), усл. ед.	Изменение от +5 до -5	Снижение 3
Стойкость к термосветозонному старению при $T = 40^\circ\text{C}$ в течение 96 ч при объемной доле озона $(5 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}\%$ при статической деформации растяжения 20%	Не допускаются трещины, видимые невооруженным глазом	Трещины отсутствуют

Таблица 7.48. Профильные изделия из ТЭП Владимирского электромоторного завода [133]

Параметры	Метод испытаний	Единица измерения	Средняя величина	
			Группа 1	Группа 2
Твердость	ASTM D 2240	Shore A	65 ± 2	80
Плотность	ASTM D 792	г/см ³	$1,195 \pm 0,025$	0,96
Прочность на растяжение	ASTM D 412	МПа	$6,5 \pm 5$	9,5
Относительное удлинение при разрыве	ASTM D 412	%	900 ± 50	820
ПТР	ASTM D 1238	г/10 мин	$2,0 \pm 0,5$	1
Озоностойкость	ASTM D 518	Напряженное состояние	Отсутствие трещин	Отсутствие трещин
	ASTM D 1149	Ненапряженное состояние	Отсутствие трещин	Отсутствие трещин
Атмосферостойкость	ASTM G 5384	Свойства	Макс. разница 5%	Макс. разница 5%
		Цвет	Стоек	Стоек

В табл. 7.48 приведены характеристики профильных изделий Владимирского электромоторного завода из ТЭП.

Группа 1 в основном используется для изготовления оконных уплотнителей, группа 2 — для автомобильных уплотнений.

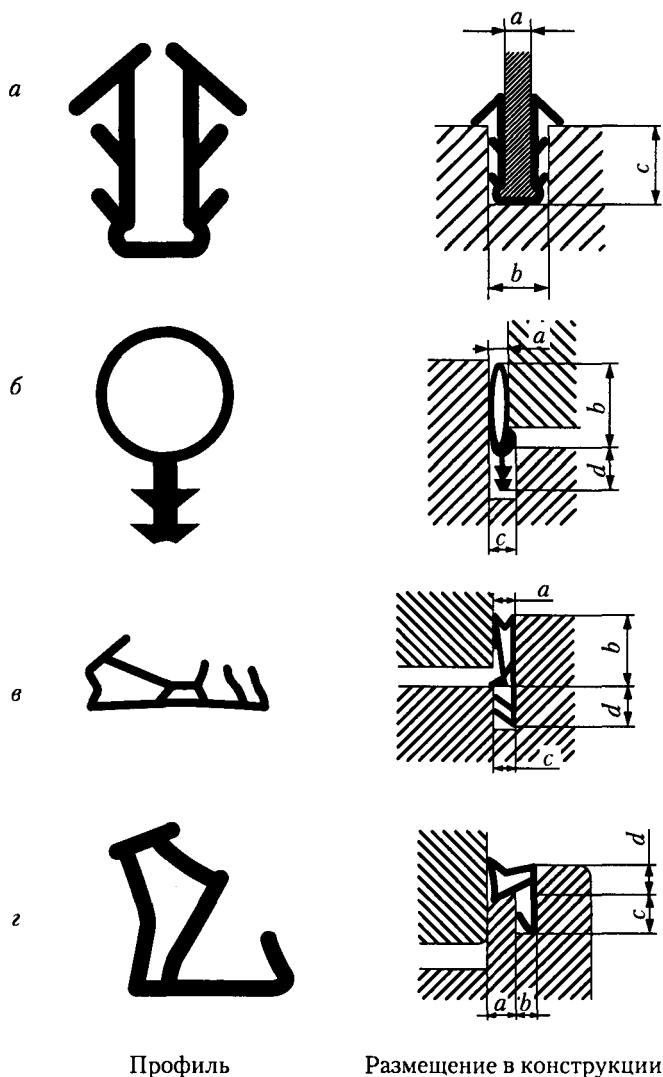


Рис. 7.19. Типы уплотнительных профилей из ТЭП

7.11.3. Экструзия термоэластопластов

Для переработки ТЭП используют одношнековые экструдеры со сменной рифленой втулкой в зоне загрузки с увеличенным шагом и глубиной нарезки [134]. Шнеки — барьерного типа длиной 25...30D с двумя смесительными секциями: первая — с диспергирующе-смесительными спиральными элементами интенсивного сдвига; вторая — ромбовидная смесительно-распределительная секция. Степень сжатия 3.5:1. Возможно также использование стандартных трехзонных шнеков, используемых для переработки ПВХ-пластика.

Подсушка перед переработкой не требуется, но если материал внесен из холодного помещения, рекомендуется подсушить в течение 2 ч при температуре 80 °С.

Поскольку ТЭПы являются резиноподобными материалами, то калибрование, как и для ПВХ-пластиката, не требуется. При изготовлении полых профилей необходим слабый поддув воздуха или сообщение внутренней полости с атмосферой.

Температура по зонам цилиндра и головки:

- цилиндр — 150–185 °С;
- температура расплава — 175–200 °С в зависимости от типа ТЭП.

Для улучшения качества поверхности профилей требуется повышенное сопротивление головки, поэтому возможна установка решетки с набором сит.

Режимы для различных видов ТЭП следует подбирать в зависимости от формы и размеров изделия. В табл. 7.49 приведены возможные проблемы при переработке ТЭП, их причины и способы устранения [134].

7.11.4. Термопластичный полиуретан (ТПУ)

Особое место среди термоэластопластов занимают уретановые. Термопластичный полиуретан известен уже давно. Он характеризуется превосходным комплексом свойств, но основное из них — высокая износостойкость. Полиуретановые подошвы обуви известны всем.

Наиболее известными производителями ТПУ являются фирмы *Bayer* и *BASF* с ее отделением *Elastogran* (ФРГ), *Dow Chemical*, *BF Goodrich* (США). Торговыми названиями ТПУ этих фирм являются соответственно *Desmopan*, *Elastollan*, *Peletan*, *Estan*.

Большинство ТПУ изготавливается на основе сложных или простых полиэфиров-полиолов, диизоцианатов с использованием удлинителей цепей [135, 136].

ТПУ характеризуются разнообразием твердости продуктов от 60 по Шору А до 74 условных единиц по Шору D, то есть от самых мягких до самых твердых. Высокая стойкость к истиранию, эластичность и устойчивость к изгибу, в том числе к многократному, повышенное сопротивление на растяжение и раздир, морозостойкость, небольшая остаточная деформация после продолжительного действия нагрузки, высокая химическая и биологическая стойкость позволяют использовать ТПУ в самых различных областях техники.

Вследствие хорошей восстановительной способности после снятия нагрузки и свариваемости ТПУ находит очень широкое применение при изготовлении разнообразных профилей, уплотнителей для окон, при производстве гибких шлангов [136].

Из отечественных ТПУ известны марки Витур по ТУ 6-55-221-1512-98 «Полиуретан термопластичный Витур ТМ-1933-90», разработанного Владимирским НПО ВНИСС [137]. Трубки, жгуты и профили из термопластичного полиуретана по ТУ 6-55-221-1344-93 применяются в качестве электроизоляции, бензопроводов и пневмопроводов; приводных и транспортирующих ремней и уплотнительных прокладок. Изделия характеризуются повышенной прочностью, эластичностью и износостойкостью по сравнению с резиной и традиционными пластмассами.

В табл. 7.50 приведены для примера свойства одной из экструзионных марок *Desmopan* 385.

Таблица 7.49. Проблемы при переработке ТЭП, возможные причины и способы устранения

Проблема	Возможная причина	Возможное решение
Шероховатая грубая поверхность	Низкая температура расплава	Увеличить температуру по зонам цилиндра Увеличить температуру на головке Проверить термопары и нагреватели
	Неисправны один или несколько нагревателей	
	Неоднородность расплава (плохое качество смешения)	Использовать шнек с большей степенью сжатия или шнек со смешительными зонами
Колебание размеров сечения профиля	Конструкция головки	Уменьшить длину формирующей зоны
	Пульсация производительности экструдера	Уменьшить скорость экструзии Использовать шнек с более длинными зонами загрузки или дозирования
		Использовать решетку с пакетом сит для увеличения давления в головке
Наличие черных или непроплавленных частиц	Загрязнение	Уменьшить температуру на головке
		Очистить шнек и головку с помощью расплава ПП или ПЭВП
		Проверить качество цветных суперконцентратов на основе ПС, ПП или ПЭ, но не ПВХ
Наличие запаха и пожелтения расплава	Слишком высокая температура расплава	Уменьшить температуру на цилиндре и головке
		Уменьшить скорость вращения шнека и давление в головке
		Подсушить гранулы
Наличие пор или пустот	Наличие влаги в материале	При использовании экструдера с дегазацией проверить, не забито ли вакуумное отверстие расплавом
Высокое давление и низкая производительность экструдера	Низкая температура расплава	Увеличить температуру на цилиндре
		Увеличить температуру на головке
	Засорился пакет сит	Очистить или заменить сетки
	Не работают нагреватели	Проверить работу термопар и нагревателей

7.11.4.1. Переработка ТПУ

Для переработки ТПУ используются одношнековые экструдеры со стандартными трехзонными шнеками длиной 25...30D, имеющими степень сжатия от 1:2 до 1:3 [135, 136]. Хорошие результаты могут быть получены при использовании экструдеров с рифленной загрузочной втулкой. Они обеспечивают постоянное питание зоны загрузки

Таблица 7.50. Свойства ТПУ *Desmopan 385* [135]

Характеристика	Метод испытания	Размерность	Величина
Твердость по Шору А/D	DIN 53505	Усл. ед.	86/32
Плотность	DIN 53479	г/см ³	1,20
Прочность при растяжении	DIN 53504	МПа	40
Относительное удлинение при разрыве	DIN 53504	%	450
Напряжение при деформации:	DIN 53504	МПа	
$e = 5\%$			0,7
$e = 10\%$			1,5
$e = 20\%$			2,5
$e = 100\%$			6,0
$e = 300\%$			17,0
Сопротивление раздиру	DIN 53515	кН/м	70
Удлинение при ударном растяжении	DIN 53512	%	42
Износ при истирании	DIN 53516	мм ³	30
Остаточная деформация:	DIN 53504	%	
при $T = 22^\circ\text{C}$ в течение 70 ч			30
при $T = 70^\circ\text{C}$ в течение 24 ч			55

ки шнека, лучший профиль распределения давления по длине, чем при использовании обычных гладких цилиндров, а также способствуют повышению производительности экструдера. Рифленая втулка должна интенсивно охлаждаться водой.

Экструдеры должны иметь повышенную мощность привода. Потребляемая мощность составляет 0,3–1,0 (кВт · ч)/кг в зависимости от исполнения цилиндра и конструкции шнека. Шнеки барьерного типа со смесительными элементами, аналогичными используемым при переработке других типов ТЭП, также способствуют улучшению качества продукции при переработке. Глубина нарезки в зоне загрузки для шнека $D = 30$ мм — 5–6 мм, для $D = 45$ мм — 6–8 мм, для $D = 60$ мм — 8–10 мм. Зазор между гребнем шнека и поверхностью цилиндра должен быть не более 0,1–0,2 мм. Шнеки с короткой зоной сжатия применять не рекомендуется.

На входе в головку рекомендуется устанавливать решетку с пакетом сит. Хорошие результаты получаются при использовании двух опорных сеток по 400 меш и двух фильтрующих по 900 меш [136].

Температуры переработки зависят от твердости ТПУ. В табл. 7.51 приведены температуры цилиндра и головки при переработке ТПУ *Elastollan*.

ТПУ чувствительны к сдвиговым напряжениям; при высокой скорости вращения шнека может ухудшаться качество продукции. В зависимости от диаметра шнека число оборотов должно находиться в пределах 12–60 об/мин, снижаясь при увеличении диаметра шнека.

Давление в головке может находиться в широких пределах (до 300 атм) в зависимости от конструкции головки и площади поперечного сечения канала в фильере.

При пуске экструдера нужно работать при малой скорости и следить за нагрузкой на привод и, если возможно, за давлением на входе в головку, так как оно может достигать весьма больших величин (до 1000 атм).

Таблица 7.51. Ориентировочные температуры экструзии ТПУ *Elastollan* [136]

Твердость ТПУ по Шору	Температура в цилиндре, °C				Адаптер, зона 5	Головка, зона 6	Фильера, зона 7
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4			
60A–80A	130–140	145–160	150–170	160–180	140–180	150–185	130–170
85A–95A	150–170	160–180	170–185	180–200	180–200	175–205	170–200

В головке не должно быть «мертвых» зон, иначе нарушается стабильность течения расплава. При экструзии шлангов и профилей головки должны иметь формующую зону с повышенной длиной: это способствует более спокойному течению расплава и релаксации входовых напряжений. Длина формирующей зоны составляет 2–4 диаметра мундштука для шлангов и стержней. При изготовлении профилей сложной формы длина формирующей зоны определяется по гидравлическому диаметру сечения, равного $4F/P$ (где F — площадь поперечного сечения канала, P — его периметр).

Экструдаты ТПУ имеют невысокую формоустойчивость, поэтому необходимо интенсивное охлаждение расплава, уже начиная с фильеры. Водяная охлаждающая ванна должна приближаться вплотную к головке, не допуская попадания воды на саму головку и электрические нагреватели.

Калибрование ТПУ, особенно мягких, проблематично из-за высокого коэффициента трения расплава о металл; с повышением твердости калибрование облегчается. В любом случае «сухое» калибрование для ТПУ не применяется. При калибровании между стенкой калибратора и поверхностью экструдированного изделия должен быть тонкий слой водяной смазки, которая осуществляется через кольцевую форсунку на входе в охлаждающую вакуумную ванну с калибрующими пластинами. Вакуум в ванне препятствует вытеканию воды через зазор между калибратором и изделием.

Толстостенные шланги, трубки и профили экструдировать в горизонтальном направлении, тонкостенные — вертикально вниз через угловую головку с последующим изменением направления на горизонтальное. Во избежание слипания тонкостенных шлангов внутрь подают опорный сжатый воздух, расход которого следует отрегулировать таким образом, чтобы он не способствовал периодическим изменениям размеров шланга. Направляющие роли в охлаждающей ванне должны иметь конфигурацию, соответствующую форме профиля. Возможные причины брака и способы их устранения такие же, как для ТЭП (см. табл. 7.49).

7.12. Проблемы при экструзии профильных изделий

При производстве профильных изделий возможны различные неполадки, связанные с работой оборудования и технологическими режимами переработки, приводящие к получению изделий неудовлетворительного качества: колебание размеров, отклонение формы профиля от заданной, плохой внешний вид, неудовлетворительные показатели физико-механических свойств. Причины брака разнообразны, и не всегда можно точно установить источник появления того или иного вида дефекта изделия.

Все виды неудовлетворительного качества экструдируемых изделий можно условно разделить на три основные группы [138–140]:

- 1) проблемы качества, зависящие от свойств перерабатываемого материала;
- 2) проблемы, связанные с работой оборудования;
- 3) проблемы, зависящие от конструкции технологической оснастки и технологических параметров процесса.

Обычно для технолога наибольший интерес представляют причины, приводящие к возникновению проблем третьей группы, так как здесь можно активно влиять на параметры процесса в целях исправления неудовлетворительных характеристик изделия. Однако истинную причину плохого качества часто весьма затруднительно установить, так как некоторые отклонения в технологии приготовления материала, повышенный износ оборудования, колебание напряжения в сети могут приводить к возникновению проблем даже для хорошо известных материалов на отлаженных режимах производства. Так, повышенная температура грануляции некоторых композиций поливинилхлоридного пластика (например, из-за неисправности приборов тепловой автоматики) приводит к частичной потере пластификатора и препятствует нормальной пластикации гранул при последующей переработке на экструдере. При переработке некоторых термопластов (полистирола, АБС-пластиков) на двухшнековых машинах, предназначенных для переработки порошкообразного ПВХ, вследствие особенностей течения материалов в каналах двухшнековых экструдеров появляются дефекты расплава, которые не характерны при работе на одношнековых машинах (пузыри, шероховатость), поэтому режимы переработки приходится подбирать к конкретному оборудованию, причем на это может затрачиваться много времени и не всегда такой подбор бывает успешным. Это означает, что нужно более продуманно относиться к выбору оборудования для переработки конкретного материала и прежде чем использовать машину для заданных целей, необходимо оценить ее технические возможности и пригодность. Основным критерием здесь является опыт технолога и пробные испытания, которых может оказаться вполне достаточно, чтобы оценить возможность и целесообразность переработки материала на данном оборудовании.

Можно назвать три основных фактора, от которых зависит высокое качество продукции: хороший материал со стабильными свойствами, хорошее современное оборудование с технологической оснасткой и опытные грамотные специалисты своего дела, разбирающиеся в материалах, оборудовании и тонкостях процесса переработки.

Хорошее технологическое оборудование включает в себя не только непосредственно агрегаты, входящие в состав технологической линии, но и вспомогательное оборудование: системы загрузки сырья, сушилки, системы водоподготовки (холодильники, фильтры и пр.), системы подготовки сжатого воздуха, канализационная система для слива воды или обратная система водоснабжения, система обеспечения вакуумом, грузоподъемное оборудование для установки тяжелой оснастки, хороший слесарный инструмент — словом, вся инфраструктура, отличающая хорошее налаженное производство от производства «на коленке».

В табл. 7.52 рассматриваются некоторые характерные проблемы, связанные с переработкой материала и технологией его переработки, которые возникают при экструзии профильных изделий, их причины и методы устранения. Естественно, проблемы, характерные для одного материала, могут оказаться совсем нехарактерными

ции при экструзии
особы устранения

но к параметрам

ека экструдера
иала на приборах

е расход
акемом фильтрую-

ериал от посто-

с зоной отсоса

менить
приборах типа

ю

е расплава до вхо-

кодимости откор-

позиции

инений и уплот-
уха

вания

ли других упру-

формирующего

Проблема	Основные причины возникновения	Способы устранения
Искажение формы и размеров изделия	Смятие профиля в тянущем устройстве	Отрегулировать степень прижатия траков к экструдированному изделию Проверить соосность установки головки, калибрующего устройства, охлаждающей ванны и тянущего устройства
•	Несоответствие формы и размеров формуемого инструмента требуемым для нормального ведения процесса ⁶	Откорректировать форму и размеры поперечного сечения формуемого инструмента, обеспечить равномерность выхода расплава по поперечному сечению фильеры
Продольные полосы, риски на поверхности профиля	Зазубрины, риски, задиры на формующих частях головки, калибрующего устройства	Очистить головку и отполировать рабочие части головки, калибратора
Поперечные полосы на поверхности профиля	Повышенная вибрация цилиндра экструдера и головки	Устранить причины вибрации (подтянуть болты крепления, установить опору под головку, проверить детали привода и его работу)
Вмятины на поверхности профиля (периодические или непрерывные) ⁷	Несоответствие формы и размеров формуемого инструмента требуемым Слишком длинная охлаждаемая зона входа в калибратор Неправильно спроектирована зона входа в калибратор Прилипание расплава к калибратору	Экспериментально установить оптимальные размеры формуемого инструмента, конфигурацию зоны входа в калибр и конструкцию узла охлаждения зоны (производится при доводке оснастки)
	Избыток материала перед входом в калибратор	Предварительно охладить экструдат воздухом или водой перед входом в калибратор Увеличить степень вытяжки экструдата
	Излишне высокая степень предварительного раздува экструдата при входе в вакуумный калибратор ⁸	Уменьшить раздув экструдата Откорректировать размеры формуемого инструмента
Колебание размеров профиля по длине	Перегрета зона загрузки экструдера Перегрета одна или несколько зон цилиндра экструдера и материал вращается вместе со шнеком, не выдавливаясь из головки либо выдавливается очень мало	Проверить охлаждение загрузочной зоны Очистить шнек, откорректировать температуры по зонам цилиндра Проверить работу приборов тепловой автоматики Проверить работу установленных на экструдере датчиков (нагрузки на привод, температуры и давления расплава, осевого давления на подшипник, крутящего момента на шнеке и т. д.)

Проблема	Основные причины возникновения	Способы устранения
Тусклая поверхность профиля	Низкая температура экструзии Резкое охлаждение экструдата на выходе из головки	Повысить температуру расплава на выходе из головки Изолировать торец головки от воздушного охлаждения (при дополнительном воздушном охлаждении экструдата) Уменьшить охлаждение экструдата Повысить температуру головки
Шероховатость поверхности, разрывы на краях	Низкая температура расплава	Отрегулировать охлаждение с помощью изменения расхода воды через основание и крышку калибра, применить дополнительное воздушное или водяное охлаждение участков профиля
Повышенная ребровая или поперечная кривизна профиля	Неравномерное охлаждение участков профиля Несоосность экструзионной головки, калибрующего устройства, охлаждающей ванны и тянущего устройства	Проверить соосность агрегатов и отрегулировать ее Отрегулировать расстояние между головкой и калибрующим устройством (в пределах 5–100 мм), не допуская сильного провисания экструдата
Разнотолщинность участков профиля	Неравномерный выход расплава по сечению фильеры из-за неравномерного обогрева головки, наличия застойных зон или из-за неправильной конструкции подводящих каналов Неравномерное охлаждение участков профиля	Проверить равномерность обогрева деталей головки Произвести чистку головки и полировку рабочих поверхностей Провести корректировку подводящих каналов Отрегулировать подачу воздуха на участки профиля перед входом в калибрующее устройство

Примечания.

- (1) Распространяется только на известные марки материалов.
- (2) При оптимальной температуре переработки.
- (3) Периодические колебания размеров.
- (4) При соединении крышки калибратора с основанием через упругие элементы.
- (5) Производится на стадиях разработки и доводки оснастки.
- (6) Производится при отладке оснастки и технологических режимов переработки.
- (7) Особенно характерны при производстве полых профилей и калибровании по контуру.
- (8) В большинстве случаев характерно для полых профилей.
- (9) Позволяет регулировать толщину стенки в узких пределах от номинальной.

Таблица 7.53. Проблемы в работе приводного двигателя экструдера [141]

Проблема	Возможная причина	Способ устранения
Двигатель не включается	Повреждение подводящих проводов или соединений Неправильно подключены токосъемные щетки Несоответствие по величине допустимого тока нагрузки Не снимается тормоз	Проверить соединения Отрегулировать подключение нейтрали Увеличить ограничения по току или работать при повышенной нагрузке Проверить соединения тормозного устройства
Падение скорости вращения при нагрузке	Перегрузка Падение напряжения Неправильно подключены токосъемные щетки	Провести измерения нагрузки при работе Проверить положение нейтрали Отрегулировать подключение нейтрали
Высокая температура корпуса двигателя	Перегрузка Недостаточное охлаждение Независимый вентилятор охлаждения двигателя не работает Слишком высокая температура окружающей среды	Провести измерения нагрузки при работе Проверить, что воздух для охлаждения подается на двигатель беспрепятственно Проверить подключение привода вентилятора Уменьшить температуру в зоне расположения двигателя
Повышенное искрение щеток	Перегрузка Неправильно подключены токосъемные щетки Запыленность контактной поверхности в месте установки щеток Износились контактные щетки Неправильное подключение обмоток Угольная щетка заливает в держателе Сильная вибрация при включенном двигателе Плохое качество щеток Обрыв в обмотках двигателя	Провести измерения нагрузки Отрегулировать подключение нейтрали Очистить контактную поверхность Вставить новые щетки Электрикам проверить подключение обмоток Обеспечить свободное перемещение щетки в держателе Устранить несбалансированное вращение Проконсультироваться с поставщиком Электрикам проверить наличие обрывов; при возможности устранить или заменить двигатель

Окончание табл. 7.53

Проблема	Возможная причина	Способ устранения
Быстро выходят из строя щетки	Повышенный шум двигателя Перегрузка Слабое прижатие токосъемных щеток Загрязнение токосъемной поверхности	Проверить форм-фактор Провести измерения под нагрузкой Проверить поджатие угольных щеток Установить причину (наличие пыли, попадание смазки, агрессивных газов) и устранить ее
Повышенный уровень шума при работе двигателя	Низкое качество токосъемных щеток Повышенный уровень шума при работе Неправильная установка подшипников, запыленность или их разрушение Не сбалансированы вращающиеся детали двигателя Вибрация преобразователя тока	Заменить щетки. Использовать щетки с пружинами Проверить форм-фактор, провести необходимые регулировки Проверка состояния двигателя, чистка и смазка подшипников или их замена Устранить причину возникновения вибрации и возможную несбалансированность арматуры Оптимизировать работу преобразователя
Нестабильная скорость вращения	Не совсем правильно установлен преобразователь Большое разнообразие режимов нагружения двигателя Нестабильные показания тахометра	Оптимизировать работу преобразователя Увеличить допустимые ограничения по току или использовать более эффективный двигатель Проверить работу тахометра
Неуправляемый разгон двигателя	Ошибки в подключении тахометра Повышенный износ угольных щеток тахометра Порван электропровод тахометра	Откорректировать полярность подключения Заменить угольные щетки Заменить электропровод

для другого. Поэтому в таблице указываются общие проблемы переработки независимо от материала, на который при необходимости дается ссылка. Одна и та же проблема может иметь различные причины, соответственно различными могут быть и пути решения проблемы.

Отдельно рассмотрены проблемы, связанные с работой главного двигателя привода экструдера (табл. 7.53) и экструдера как цельного агрегата (табл. 7.54). Последние две группы проблем носят общий характер и могут рассматриваться в любом экструзионном процессе. Проблемы рассматриваются в такой последовательности из-за предположения, что оборудование обычно работает нормально, а возникающие проблемы связаны с конструкцией оснастки, свойствами материала и режимами его переработки.

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Перегрузка двигателя вакуум-насоса	Слишком большая подача воды к вакуум-наосу («захлебывается»)	Отрегулировать подачу воды до достижения максимального разрежения при минимальной подаче воды
	Текущее значение тока превышает допустимое значение для установленной мощности двигателя	Проверить паспортные данные двигателя
	В вакуум-насос подается мало воды	Отрегулировать подачу воды до достижения максимального разрежения при минимальной подаче воды
	Вытяжная линия имеет повышенное сопротивление или не соединена с атмосферой	Уменьшить сопротивление линии отсоса, соединить ее с атмосферой
Низкий вакуум	Слишком теплая вода	Отрегулировать температуру воды (при подаче холодной воды вакуум выше)
Плохо нагревается одна или несколько зон цилиндра	Перегорел бандажный нагреватель	Заменить нагреватель
	Терморегулятор не подает сигнал на включение нагревателя при снижении температуры ниже заданного предела	Заменить терморегулятор
	Неисправен ртутный контактор в шкафу тепловой автоматики	Заменить ртутный контактор
	Не включена зона нагрева	Включить соответствующую зону нагрева
	Плохо установлена термопара	Проверить установку и поджать термопару
	Перепутаны термопары и соответствующие нагреватели зон	Подключить регулирующие термопары к соответствующим нагревателям и терморегуляторам
	Шток соленоидного клапана для подачи воды находится в открытом положении	Заменить регулирующий клапан
Перегрев тепловых зон	Терморегулятор не подает сигнала на отключение нагревателя при превышении установленного предела	Заменить терморегулятор
	Шток клапана для сброса давления находится в открытом положении	Заменить клапан сброса давления
	Перепутаны термопары и соответствующие нагреватели зон	Подключить регулирующие термопары к соответствующим нагревателям и терморегуляторам

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Цепь не нагревается до заданной температуры	Мал расход воды через теплообменник. Повышенное сопротивление теплообменника или закрыт общий регулирующий клапан	Проверить подающие шланги, уменьшить общее сопротивление, открыть клапан. Заменить теплообменник
	Не открывается соленоидный клапан для регулирования жидкостного нагрева зоны	Заменить неисправный соленоидный клапан
	Неисправен насос, двигатель, терморегуляторы или шланги для подачи теплоносителя	Заменить насос, двигатель, терморегуляторы или подающие шланги
	Система масляного нагрева засорена или имеет повышенное сопротивление	Заменить масляный фильтр. Очистить и промыть масляную систему
	Перегорел бандажный нагреватель	Заменить нагреватель
	Неисправна термopара	Заменить термopару
	Не включается ртутный контактор терморегулятора	Заменить терморегулятор
	Постоянно включен соленоидный клапан для охлаждения	Заменить соленоид
	Неисправен ртутный контактор	Заменить ртутный контактор
	Постоянно открыт шток соленоидного клапана охлаждения	Заменить соленоидный клапан
Перегрев зон	Мала подача воды: засорился фильтр	Сменить фильтр
	Вышел из строя масляный насос, двигатель насоса или подающие шланги	Заменить
	Система масляного нагрева засорена или имеет повышенное сопротивление	Заменить масляный фильтр. Очистить и промыть масляную систему
	Терморегулятор не отключает нагреватель при превышении установленной температуры	Заменить терморегулятор
	Неисправна термopара на выходе расходомера	Заменить термopару
	Мал расход воды через теплообменник	Прочистить или заменить теплообменник
	Не включается соленоидный клапан для подачи воды или шток клапана постоянно находится в закрытом положении	Заменить соленоидный клапан

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Мал вакуум для дегазации расплава	Соленоидный клапан для подачи жидкости на охлаждение закрыт Шток клапана для сброса давления открыт Засорился фильтр Вышел из строя масляный насос, двигатель насоса или подающие шланги Система масляного нагрева засорена или имеет повышенное сопротивление Мал расход воды	Заменить соленоидный клапан Заменить клапан Сменить фильтр Заменить Заменить масляный фильтр. Очистить и промыть масляную систему Проверить шланг подачи Проверить места подсоединения подающих шлангов Проверить кольцевое уплотнение смотрового окна Очистить седло клапана Заменить фильтр Проверить соленоидный клапан Проверить насос, двигатель, подающие шланги Проверить и исправить
Повышенная вибрация	Плохо выполнены электрические соединения в приводе	Проверить и исправить
Повышенный шум с задней стороны машины	Дефектный подшипник в редукторе Дефектный подшипник в двигателе Несправен подшипник в редукторе Грубая обработка поверхности шестерен в редукторе Плохо выполнены соединения между редуктором и коробкой скоростей	Заменить подшипник Заменить подшипник Заменить подшипник Устранить места грубой обработки на шестернях редуктора Проверить и исправить

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Нестабильные показания скорости вращения	Неисправна плата указателя скорости для ДПТ Неисправна главная электронная плата, определяющая работу ДПТ Неправильная подача напряжения на двигатель постоянного тока ДПТ	Заменить электронную плату указателя скорости Заменить плату Проверить и исправить подачу напряжения
Указатель дозатора не работает	Перегрузка двигателя по току Стрелка потенциометра установлена на нуле Регулирующий прибор не получает сигнала с кнопки управления из-за попадания в кнопку твердых предметов Стартовая обмотка не получает сигнал от регулирующего прибора или она неисправна Перегорели предохранители привода Вышел из строя двигатель питателя Разбит держатель предохранителя Вышла из строя электронная плата, ответственная за работу главного двигателя и питателя	Проверить и заменить (при необходимости) ДПТ Сбросить показания или заменить потенциометр Очистить пусковую кнопку Проверить все электрические соединения или заменить стартовую обмотку Заменить предохранители Заменить двигатель Заменить предохранитель Заменить плату
Указатель работы питателя не показывает максимальную загрузку	Установленные значения регулятора главного двигателя низкие или равны нулю	Увеличить установленные значения на регуляторе основного двигателя
Перегрев зоны загрузки экструдера	Неисправен соленоидный клапан регулирования подачи воды или перегорел предохранитель, связанный с его работой Загрязненная вода для охлаждения экструдера или недостаточное давление воды в системе подачи	Проверить соленоидный клапан и/или заменить предохранитель Заменить фильтр или проверить систему подачи воды на наличие утечек

7.13. Техника безопасности при переработке различных термопластов

Работа на экструзионном оборудовании должна выполняться в соответствии с правилами техники безопасности и противопожарной техники, а также нормами производственной санитарии.

При экструзии температура расплавов полимеров может находиться в диапазоне 100–350 °С. Помимо ожогов, которые могут возникать при соприкосновении незащищенных участков тела с расплавом, при высокой температуре выделяются летучие газообразные вещества, воздействующие на органы дыхания, центральную нервную систему и другие органы человека. Концентрация летучих веществ и степень их воздействия на человека зависит от температуры переработки, эффективности работы приточно-вытяжной вентиляции, времени воздействия вредных паров на организм человека.

Ниже приведены типичные выделения вредных газообразных продуктов при переработке различных термопластов, их влияние на человека, предельно-допустимые концентрации и мероприятия по защите от действия вредных веществ [143–149]. Действие некоторых токсических веществ на организм человека еще изучено недостаточно, поэтому не всегда можно поставить правильный диагноз отравления. В некоторых случаях приводятся данные, полученные при воздействии на организм животных (мышей, крыс).

7.13.1. ПВХ

Диапазоны температур переработки, °С:

- композиции непластифицированного ПВХ: 170–210;
- композиции пластифицированного ПВХ: 150–180;
- композиции хлорированного ПВХ: 170–210;
- пено-ПВХ: 190–200.

Выделяющиеся вредные вещества. ПВХ выделяет хлористый винил даже при комнатной температуре. Его содержание в сухом полимере 0,01–0,4 г/кг. При нагревании выше 150 °С ПВХ частично распадается с выделением HCl (до 33,65% при 100–160 °С). При термической деструкции полимера выделяется также оксид углерода CO.

Композиции, содержащие пластификаторы, стабилизаторы и другие добавки, выделяют их в воздух при приготовлении и переработке, например, *дибутилфталат*, применяемый как пластификатор для композиций ПВХ (а также для эфиров целлюлозы, полистирола).

При переработке вспенивающихся композиций НПВХ выделяются те же вредные вещества, что и при обработке монолитного ПВХ. Кроме того, выделяются пары порофора ЧХЗ-21 (азодикарбонамида).

Влияние на организм человека. При вдыхании хлористого винила развивается сосудистый невроз; при длительном вдыхании и в больших количествах развивается вегетососудистая дистония, приводящая к патологическим изменениям в костях.

При содержании выше нормы свинца (содержание других летучих веществ может быть ниже нормы), выделяющегося из свинцовых стабилизаторов, появляются головокружение, головная боль, тошнота, снижение аппетита.

При длительном действии пластификаторов наблюдаются признаки токсического полиневрита. При изготовлении или переработке павинола наблюдается головная боль, тошнота, утомляемость, резь в глазах, першение в горле. Постепенно развиваются дерматиты и экземы. Болезненные явления проходят при прекращении работы и возобновляются при повторном соприкосновении.

ДБФ, как и другие фталаты, способен вызывать функциональные, а в дальнейшем и органические изменения в центральной и периферической нервной системе. Обладает умеренно выраженными кумулятивными и слабыми раздражающими свойствами. Вдыхание паров ДБФ вызывает снижение возбудимости вестибулярного и обонятельного анализаторов и кожной чувствительности, заболевание желудочно-кишечного тракта и верхних дыхательных путей.

Пары ЧХЗ-21 вызывают заболевание кожи (дерматиты). При прекращении контакта с ЧХЗ болезненные явления прекращаются и появляются вновь при возобновлении контакта.

Предельно-допустимые концентрации (ПДК) в воздухе помещения.

Пыль полимера — 6 мг/м^3 .

Дибутилфталат (ДБФ) — $0,5 \text{ мг/м}^3$.

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. При выделении мономера, продуктов деструкции и пыли необходима, в первую очередь, защита органов дыхания, для чего служат вытяжные устройства, ограничение температур нагрева полимера. Для защиты от паров пластификаторов, в частности ДБФ, паров ЧХЗ применяется промышленный противогаз марки А, респиратор, при наличии тумана (аэрозоли) ДБФ-противогаз с фильтром. Помещение, где производится работа с ДБФ, ЧХЗ должно быть оборудовано вытяжной вентиляцией и местными отсосами.

Для защиты кожных поверхностей применяются спецодежда, перчатки, защитные кремы типа «биологических перчаток».

Экологические свойства ПВХ. Основной недостаток ПВХ — выделение вредных веществ не столько при эксплуатации и переработке, сколько при сжигании изделий из него. Полагают, что при сжигании ПВХ выделяет вредные для здоровья диоксины [150, 151].

Независимые исследования показали, что производство всех хлорсодержащих продуктов в мире дает суммарное выделение диоксинов в окружающую среду всего лишь 0,1% от общего количества выделения диоксинов в окружающую среду в результате антропогенной деятельности.

Источники выделения диоксинов в окружающую среду делятся на три группы:

- горение, результаты промышленной деятельности и прочие (сжигание мусора на свалках, что является крупнейшим источником выделения диоксинов), выделение диоксинов вследствие возгораний электрокабельной изоляции, сжигания бытовых отходов; загрязнения от металлургической промышленности; транспортные загрязнения;

- отходы бытового отопления (сжигание нефтепродуктов, газа, угля, дров);
- побочные источники, в частности, испарения диоксинсодержащих антисептиков, применяемых в деревообрабатывающей промышленности.

Второстепенные источники выделения диоксинов — промышленность, использующая в производственных процессах сжигание ископаемого топлива. Это сжигание ископаемого газа, биогаза и осадков канализационных стоков; высокотемпературные технологические процессы.

Под давлением «зеленых» в Европе введены жесткие нормы на технологию уничтожения мусора путем открытого сжигания.

Подробный анализ экологической вредности ПВХ показывает, что строительные изделия из ПВХ (окна, двери, отделочные профили, кабель-каналы, трубопроводы, панели, и многое другое), мягкие изделия (игрушки, клеенки, занавески) экологически безопасны и выделяют не больше вредных веществ, чем любые другие материалы [150].

7.13.2. Полиэтилен

Диапазон температур переработки экструзией:

ПЭНП: 120–190 °С;

ПЭВП: 160–250 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. При нагревании до 150 °С ПЭНП выделяет кислоты, эфиры, непредельные углеводороды, перекисные и карбонильные соединения, окись углерода, 1,2-бензпирен.

В результате контакта ПЭВП с воздухом при 250 °С в газовой среде обнаруживаются СО, альдегиды (в том числе формальдегид).

Влияние на организм человека. ПЭНП (пыль, вытяжки) не оказывают заметного влияния на организм. Некоторые марки допускаются для контакта с пищевыми продуктами.

Вдыхание паров продуктов термического разложения ПЭВП ведет к раздражению дыхательных путей, при более высоких концентрациях — к нарушению дыхания. Проверка на животных показала наличие кровоизлияний и дистрофических изменений в почках. Длительное вдыхание пыли ПЭВП (100 мг/м³) дает слабо выраженное нарушение функций печени.

ПДК в воздухе помещения. Смесь летучих продуктов термоокислительной деструкции предложено нормировать по сумме альдегидов 5 мг/м³.

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Удаление летучих продуктов от мест их образования — общеобменная вентиляция, местные отсосы.

7.13.3. Полипропилен (ПП)

Диапазон температур переработки экструзией — 180–240 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. При действии кислорода и высокой температуры ПП разлагается с образованием органических кислот, эфиров, непредельных углеводородов, перекисных соединений, формальдегида, ацетальдегида, CO, CO₂.

Влияние на организм человека. Длительное вдыхание пыли вызывает лейкоцитоз и изменения в легких. При вдыхании продуктов деструкции могут наблюдаться раздражение конъюнктивы глаз и верхних дыхательных путей.

ПДК в воздухе помещения. Для нестабилизированного ПП — 10 мг/м³; для продуктов термодеструкции — 5 мг/м³ (по альдегидам).

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Удаление летучих продуктов от мест их образования — общеобменная вентиляция, местные отсосы.

7.13.4. Сополимер этилена с пропиленом (СЭП)

Выделяющиеся вредности. Под воздействием кислорода и высокой температуры СЭП разлагается с образованием органических кислот, эфиров, непредельных углеводородов, перекисных соединений, формальдегида, ацетальдегида, CO, CO₂.

Влияние на организм человека. При вдыхании продуктов распада в крови обнаруживается карбооксигемоглобин, наблюдается отек легких, бронхит, очаговая пневмония, повышение возбудимости центральной нервной системы.

Основные меры предупреждения воздействия. Контроль воздушной среды по концентрации окиси углерода CO, устранение выделения в воздух летучих продуктов термоокислительной деструкции

7.13.5. Полистирол и его сополимеры (полистирол блочный, эмульсионный, САМ-сополимер стирола с α-метилстиролом, СНП)

7.13.5.1. АБС

Диапазон температур переработки экструзией — 160–240 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. При температуре выше 200 °С полистиролы и его сополимеры разлагаются с образованием стирола и других низкомолекулярных соединений, димеров и тримеров. При нагревании СНП до 100–240 °С в воздух выделяются стирол, акрилонитрил, CO, HCN, дибутилфталат.

При нагреве АБС свыше 250 °С происходит частичная деструкция, сопровождаемая выделением незначительных количеств паров стирола, α-метилстирола, акрилонитрила, цианистого водорода и окиси углерода [145].

Влияние на организм человека. Токсическое действие определяется количеством стирола. Вызывает нарушение функции вегетативной системы, астенические реакции. При длительном вдыхании выделяющихся вредных паров и длительном контакте с жидкими продуктами (более 10 лет) могут появляться болезни кожи (дерматиты). Отравление продуктами распада СНП проявляются в возбуждении, изменении ритма дыхания, раздражении глаз и верхних дыхательных путей, судорогах клонического и тонического характера, в крови обнаруживаются карбоксигемоглобин.

Пары метилстирола, выделяющиеся при переработке АБС, вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей, нарушение функций центральной нервной системы и печени, оказывают влияние на кроветворные органы. Пары нитрила акриловой кислоты оказывают раздражающее действие на слизистые оболочки глаз и верхних дыхательных путей. Цианистый водород может вызывать удушье вследствие паралича органов дыхания.

ПДК в воздухе помещения. Стирол — 5 мг/м^3 ; аэрозоль САМ — 5 мг/м^3 ; СО — 20 мг/м^3 . Пары нитрила акриловой кислоты — $0,5 \text{ мг/м}^3$; HCN — $0,3 \text{ мг/м}^3$; α -метилстирола — 5 мг/м^3 .

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Защита от вдыхания выделяющихся летучих соединений и пыли. Защита кожи. Обязательные местные вытяжные устройства. При наличии в воздухе значительных количеств летучих веществ деструкции СНП, и среди них СО, HCN — использование промышленного фильтрующего противогаза марки БКФ. Удаление продуктов термического разложения в местах их образования.

7.13.6. Полиакрилаты (ПММА, САН и др.)

Диапазон температур переработки экструзией — $180\text{--}220^\circ\text{C}$.

Выделяющиеся вредные вещества. При термическом разложении (выше $220\text{--}250^\circ\text{C}$) выделяются остатки мономера (эфиры метакриловой кислоты), перекисные соединения, пары пластификаторов, формальдегид, метанол, сернистый газ, цианиды, акрилонитрил.

Влияние на организм человека. При длительном вдыхании вредных веществ наблюдается головная боль, быстрая утомляемость, раздражительность, слезотечение, могут наблюдаться изменения в составе периферической крови. Выявлены отклонения со стороны нервной системы, астеновегетативный невроз и вегетативно-сосудистая дистония, возможны болезни кожи (дерматиты). При вдыхании паров метакрилата и акрилонитрила — головная боль, головокружение, бессонница, быстрая утомляемость, плаксивость, першение в горле, зуд кожи. Может наблюдаться нарушение функций центральной нервной системы, заболевания желудочно-кишечного тракта и сердечно-сосудистой системы, понижение уровня гемоглобина, числа эритроцитов, ретикулицитоз, нарушение синтеза гема. Признаки интоксикации нарастают с увеличением стажа работы.

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Защита органов дыхания от летучих выделений и пыли. Защита кожи рук.

7.13.7. Полиацетали (полиформальдегид и его сополимеры)

Диапазон температур переработки экструзией — 180–220 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. При нагреве деполимеризуется с выделением формальдегида.

Влияние на организм человека. Раздражение верхних дыхательных путей и кожи при действии паров формальдегида.

ПДК в воздухе помещения. Формальдегид — 5 мг/м³.

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Защита органов дыхания от летучих и пыли. Оборудование местных отсосов.

7.13.8. Полиамиды

Диапазон температур переработки экструзией — 180–240 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. Выделение при термодеструкции мономеров (капролактама и др.).

Влияние на организм человека. При воздействии капролактама наблюдаются головные боли, головокружение, слабость, утомляемость, шелушение кожи, ломкость ногтей, краснота, отечность.

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Герметизация всех пылящих операций. Удаление летучих веществ в местах их образования.

7.13.9. Поликарбонаты

Диапазон температур переработки экструзией — 260–300 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. Деструктируют (выше 250–270 °С) с выделением фенолов (выше 330 °С), хлористого метилена, дифенилолпропана.

Влияние на организм человека. Содержание паров продуктов распада и пыли дифенилолпропана вызывает головную боль, головокружение, боли в конечностях, нарушения со стороны вегетативной нервной системы, остеосклеротические изменения кистей рук и нарушения в составе белков крови, что рассматривается как начальные явления хронической интоксикации хлористым метиленом.

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Защита органов дыхания от хлористого метилена и др. газообразных продуктов распада. Общая и местная вентиляция. При переработке — нагрев материала не выше 330 °С.

7.13.10. Термопластичные полиуретаны (ТПУ)

Диапазон температур переработки экструзией — 170–240 °С.

Выделяющиеся вредные вещества. При высоких температурах выделяются изоцианаты, углеводороды.

Влияние на организм человека. Воздействие паров изоцианатов вызывают резь в глазах, головную боль, раздражительность, повышенную утомляемость, сонливость, иногда боли в области сердца, желудка и печени. Обнаруживается также конъюнктивит и воспалительные заболевания кожи (от диизоцианатов).

Индивидуальная защита. Меры предупреждения. Тщательная защита органов дыхания, глаз и кожи. Общеобменная вентиляция и местные отсосы над местами выделения вредностей, в первую очередь, над экструзионными головками.

Литература

7.1. Поливинилхлорид и композиции на его основе

1. Получение и свойства поливинилхлорида / Под ред. Е. Н. Зильбермана. — М.: Химия, 1968. — 432 с.
2. ГОСТ 14332-78 Поливинилхлорид суспензионный. Технические условия. — Издательство стандартов. — 1987. — 22 с.
3. Поливинилхлоридные пластики и их применение в кабельной технике / Под ред. И. Д. Троицкого. — М.: Энергия, 1978. — 162 с.
4. Юрыгин С. В. Выбор рецептуры для экструзии оконного профиля / С. В. Юрыгин // Окна и двери. — 2000. — № 11–12.
5. Маския Л. Добавки для пластических масс / Л. Маския; Пер. с англ. — М.: Химия, 1978. — 184 с.
6. Крыжановский В. К. Технические свойства полимерных материалов: Учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Приматченко и др. — СПб.: Профессия, 2003. — 240 с.
7. Володин В. П. Реологические свойства поливинилхлоридных пластикатов при экструзии / В. П. Володин // Основные методы формования изделий из пластмасс / НПО «Пластик». — М.: НИИТЭХИМ, 1979. — С. 3–18.
8. Hostalit. Kunststoffe Hoechst, Hostalit Z am Bau // Инф. материалы фирмы Хехст, ФРГ, Febr. 1970.
9. «Пластик», 2004, № 1, с. 6.
10. Database Campus 4.5. «Solvay», 2003. — <http://www.CAMPUSplastics.com>.
11. Murray T. A. «Plast. Technology», 1978. V. 24, № 2, pp. 99–105.
12. Инструменты для экструзии ПВХ // Окна и двери: инф. бюл. — 2000. — № 9. Материалы семинара фирмы «Technoplast», Австрия «Технопласт — новые технологии в России», М., 31 января 2002.

7.2. Полиолефины

13. Энциклопедия полимеров. Т. 2, 3. — М.: Советская энциклопедия, 1974.
14. Сирота А. Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов / А. Г. Сирота. — Л.: Химия, 1974. — 174 с.
15. Мерц Р. Сырье для производства пластмассовых труб и фасонных деталей. Докл. // М-лы выставки «Трубы-77», сент. 1977. — М., 1977.
16. Полиолефины. Каталог. ОНПО «Пластполимер». НИИТЭХим, Черкассы, 1979. — 35 с.
17. Фридман М. Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов / М. Л. Фридман. — М.: Химия, 1977. — 400 с.
18. Emmerich A. Переработка ЛПЭНП / A. Emmerich // Plast. Technology. — 1980. — V. 26. — № 2. — P. 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45.
19. Hwang B. K. Экструзии ЛПЭНП и ПЭСП / B. K. Hwang, A. Kharazi, T. Nicholas // Plast. Engn. — 1985. — April. — P. 49–52.
20. Modern Plastics Encyclopedia '98. McGraw-Hill Co., Inc. // <http://www.modplas.com>.
21. Барвинский И. А. Литые термопластичные материалы 2000–2003: Справ. / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская // <http://www.abuniversal.webzone.ru>
22. Рекламные материалы по продукции Томского нефтеперерабатывающего комбината, 2003 г.
23. Высокомолекулярный полиэтилен. Рекламные материалы ООО «Капролит» // <http://www.gatchina.biz>.
24. Полипропилен / Пер. со словацкого. — Л.: Химия, 1967. — 316 с.
25. Крессер А. Полипропилен / А. Крессер; Пер. с англ. под ред. В. В. Лапшина. — М.: Изд-во «ИЛ», 1968. — 231 с.
26. Иванюков Д. В. Полипропилен / Д. В. Иванюк, М. Л. Фридман. — М.: Химия, 1974. — 270 с.
27. Gebler H. Røgre aus Polypropylen // Plastverarbeiter. — 1978. — Bd. 29. — № 4. — S. 189–192.
28. Meinhardt J., Gebler H. Polypropylen als Werkstoff fuer Heizrohre im Warmwassersfussbodenheizungen // Plastverarbeiter. — 1979. — Bd. 30. — № 12. — S. 766–772.
29. Gebler H., Schiedrum H. O., Oswald E., Kamp W. Die Eigenschaften von Polypropylen-Rohren und deren Beeinflussung durch Werkstoff und Herstellung // Kunststoffe. — 1980. — Bd. 70. — № 4. — S. 186–192; № 5. — S. 246–253.
30. Fortiflex Extrusion. Celanese Fortiflex Polyethylene. // Bulletin P 3B, 1963, Celanese Polymer Co.
31. Domininghaus H. Введение в технологию пластмасс. Переработка и применение. Ч. 2: Информация Hoechst AG CH-9403 Goldach SG. / H. Domininghaus. // Schweizer Maschinenmarkt. — 1969. — 1970.
32. Hostalen G. Kunststoffe Hoechst. Extrusionstechnik / G. Hostalen: Рук-во фирмы Hoechst, ФРГ, 1970.
33. Узденский В. Б. Модификация полимерных материалов – придание изделиям новых потребительских свойств и улучшение условий переработки (НПФ «Барс-2», С.Петербург) / В. Б. Узденский // Пластикс. — 2002. — № 4.
34. ООО «Сталкер». Добавки для полимеров // <http://www.stalkerm.spb.ru/>
35. Рябинин Д. Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. — М.: Машиностроение, 1965. — 363 с.
36. Швабауэр В. В. Исследование и разработка методов расчета процессов калибрования и охлаждения при высокоскоростной экструзии труб из термопластов: Дис. ... канд. техн. наук / В. В. Швабауэр; МИХМ. — М., 1981.
37. Материалы симпозиума по трубам фирмы *Reifenhauser* на выставке «Трубы-77». — М., 1977.
38. Гранулированная соль для удаления остатков термопластов // Maschintmarkt. — 1993. — Bd. 99. — № 31–32. — S. 65.
39. Филъберная паста. ООО «Полимер-Проект XXI» // <http://www.polymerproekt.ru>

7.3. Полистирольные пластики

40. Полистирол. Физико-химические основы получения и переработки / А. Я. Малкин, С. А. Вольфсон, В. Н. Кулезнев и др. — М.: Химия, 1975. — 288 с.
41. Бакнелл К. Б. Ударопрочные пластики / К. Б. Бакнелл; Пер. с англ. — Л.: Химия, 1981. — 328 с.
42. Полистирол: Инф. м-лы ЗАО «Полистирол». — Омск, 2002 г.
43. WEB Site: <http://www.omskplast.com>
44. Waxman C. ABS / C. Waxman. — *Plastics*. — 1969. — V. 34. — № 378. — P. 418–426.
45. Назначение марок пластиков АБС. ОАО «Пластик», Узловая. Московское представительство ОАО «Пластик».
46. DataBase Campus 4.5, 2001. <http://www.CAMPUSplastics.com>.
47. Барвинский И. А. Литые термопластичные материалы. 2000–2003 // И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская // <http://www.abuniversal.webzone.ru>.
48. АБС-пластики // *Mater. Eng.* — 1977. — V. 85. — № 2. — С. 48–54.
49. Чижов Ю. П. Листовой материал из АБС-пластика / Ю. П. Чижов, З. Н. Бакулина, В. В. Абрамов // *Полимерные материалы и оборудование для переработки их в изделия* / НПО «Пластик». — М.: НИИТЭХИМ, 1978. — С. 9–18.
50. Переработка Новодура: Информ. м-лы фирмы «Bayer», ФРГ. — 1967.
51. Терлуран: Технич. информ. фирмы BASF, ФРГ. — 1968 г.
52. Rauwendaal C. The ABS's of Extruder Screw Design / C. Rauwendaal // *Advances in Polymer Technology*. — 1989. — V. 9. — № 4. — P. 301–308.

7.4. Полиакрилаты

53. Марек О. Акриловые полимеры / О. Марек, М. Томка; Пер. с чешского. — М., Л.: Химия, 1966. — 318 с.
54. «Diakon» Acrylic materials. Nature, properties, and uses. ICI Ltd. Plastics Division. IS 564, 699.
55. «Diakon» Acrylic materials for extrusion: Рук-во по переработке фирмы ICI, Англия, № 841, 1963.
56. Дебский В. Полиметилметакрилат / В. Дебский; Пер. с польск под ред. Д. М. Филиппенко. — М.: Химия, 1972.
57. Полиметакрилаты // *Plasverarbeiter*. — 1977. — Bd. 28. — № 6. — S. 289–298.
58. Buck M. Polymethacrylate / M. Buck, G. Schreyer // *Kunststoffe*. — 1980. — Bd. 70. — № 10. — S. 656–658.
59. Bohme K. Verarbeitung und Anwendung schlagzäh modifizierter PMMA-Formmassen / K. Bohm // *Kunststoffe*. — 1977. — Bd. 67. — № 6. — S. 316–320.
60. Baker G. Extruding EMA Copolymer: A Processors' Guide / G. Baker // *Plast. Technology*. — 1980. — V. 26. — P. 105–107.
61. «Diakon» Acrylic materials Extrusion. ICI Ltd. Plastics Division. IS 841.
62. Surface Polishing Technique for «Perspex» Acrylic Sheet. ICI Ltd. Plastics Division. IS 523.

7.5. Полиамиды

63. Нельсон У. Б. Технология пластмасс на основе полиамидов / У. Б. Нельсон; Пер. с английского. — М.: Химия, 1979.
64. Конструкционные пластмассы / И. Хуго, Н. Кабелка, И. Кожени и др.; Пер. с чешского. — М.: Машиностроение, 1969.
65. *Aquitaine Organico. Magazine-7*, Франция Комплект проспектов, 1969.
66. *Rilsan Extrusion. Aquitaine Organico*, Франция, 1970
67. Golsin J. P., Bonñer R. M. The new polyamides. — *Modern Plastics*, 1966. V. 44, № 1A.
68. Zahn E. Полиамиды / E. Zahn. — *Kunststoffe*. — 1976. — Bd. 66. — № 10. — S. 591–596.

69. The Extrusion and Machining of Maranyl Nylon. Information Service note 1105, ICI Plastics Division.
70. Методы испытания полимерных материалов: По м-лам компании GE Plastics // <http://www.polimer.net>.
71. Vestamid. Chemische Werke Huls AG.

7.6. Поликарбонат

72. Шнелл Г. Химия и физика поликарбонатов / Г. Шнелл; Пер. с англ. под ред. Г. С. Колесникова. — М.: Химия, 1967. — 229 с.
73. Поликарбонаты: Каталог. НПО «Пластмассы». — Черкассы, НИИТЭХИМ, 1978.
74. Экструзия Лексана: м-лы фирмы GE Plastics Ex/L-05-77, Бельгия.
75. Макролон. Поликарбонат фирмы Bayer, ФРГ: Каталог. — 1967.
76. Lee C. Экструзия профилей из поликарбоната / C. Lee, R. T. Rische // *Plast. Technology*. — 1978. — V. 24. — № 5. — P. 73–78.
77. Сабсай О. Ю. Технологические свойства термопластов: Обзор / О. Ю. Сабсай, Н. М. Чалая // *Пластические массы*. — 1992. — № 1. — С. 5–13.
78. Lexan. Engineering Thermoplastics: Каталог pl 100. GEPlastics, Europe. Lexan profile; Каталог Lexan Russ/1M/0898, GE Plastics, 2004.

7.7. ПФА

79. Ениколопан Н. С. Химия и технология полиформальдегида / Н. Ениколопан, С. А. Вольфсон. — М.: Химия, 1968. — 279 с.
80. Delrin. Информационные материалы компании Du Pont, США E-15452, октябрь 1981.
81. От замысла до коммерциализации с компанией «Дюпон». Конструкционные полимеры: Информационные материалы компании. — 2003.
82. Kunststoffe Hoechst. Hostaform, 1970.
83. Hostaform C. Acetal copolymerisat, Fabwerke Hoechst, ФРГ.
84. Ацетальный сополимер Celcon. Свойства: Бюл. CIA фирмы Amcel (филиал A.O. Celanese, США).
85. Celcon Acetal Copolymer. Extrusion of Celcon: Бюл. СЗВ. фирмы «Celanese», США, 1972.
86. Tenac acetal homopolymer, Asahi Chemical, Япония, 1978.
87. ОАО «Уральская химическая компания» // <http://www.uralchimplast.ru>.

7.8. Этролы

88. Малинин Л. Н. Эфиروцеллюлозные пластмассы / Л. Н. Малинин. — М.: Химия, 1978. — 128 с.
89. Cellidor. Органические термопластичные эфиры целлюлозы: Информ. м-лы фирмы Bayer, ФРГ, 1974.
90. Эфиры целлюлозы // *Справочник по пластическим массам*. / Под ред. М. И. Гарбара, В. М. Катаева, М. С. Акутина. Т. 2. — М.: Химия, 1969. — С. 196–248.
91. Fisher W., Leuschke C., Baasch H.-P. Модифицированные полимером формовочные массы на основе ацетобутиратцеллюлозного этрола / W. Fisher, C. Leuschke, H.-P. Baasch // *Kunststoffe*. — 1977. — Bd. 67. — № 6. — S. 348–352.
92. Яковлев А. Д. Технология изготовления изделий из пластмасс / А. Д. Яковлев. — Л.: Химия, 1968.

7.9. Пеноматериалы

93. Берлин А. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы / Ф. Ф. Берлин, Ф. А. Шутов. — М.: Химия, 1980.

94. Семерджиев С. Г. Термопластичные конструкционные пенопласты / С. Г. Семерджиев; Пер. с болг. — Л.: Химия, 1979.
95. Переработка вспенивающихся термопластов / Под ред. В. А. Брагинского, Ф. А. Шутова. — Л.: Химия, 1979.
96. Barth H.. Экструзия пено-ПВХ / H. Barth // Kunststoffe. — 1974. — Bd. 64. — № 1. — S. 2–7. — 1977. — Bd. 67. — № 3. — S. 87–88.
97. Anguita P. R. Экструзия профильных изделий из пено-ПВХ / P. R. Anguita // Rev. plast. mod. — 1976. — 31. — № 236. — P. 249–259.
98. Оборудование и технология экструзии жестких вспененных профилей и труб из поливинилхлорида: Обзорн. информ. / В. П. Володин, Э. А. Колосс, И. В. Ситникова и др. — М.: НИИТЭХИМ, 1978. — 22 стр.
99. Dirla M. Экструзия изделий из интегрального пеноПВХ с гладкой поверхностью / M. Dirla // Maschinenmarkt. — 1974. — Bd. 80. — № 74. — S. 1436–1438.
100. Dilley E. R. Использование химических газообразователей для производства пенопластов / E. R. Dilley // Trans. J. Plast. Int. — 1966. — Febr. — P. 17–20.
101. Pauli H. Профили из жесткого пено-ПВХ / H. Pauli // Kunststoffe-Plastics. — 1978. — Bd. 25. — № 1. — S. 35–36.
102. Steigerwald F. Опыт изготовления профилей из пено-ПВХ / F. Steigerwald // Plastverarbeiter. — 1975. — Bd. 26. — № 10. — S. 588–592.
103. Gould R. W. Экструзия интегрального пено-ПВХ / R. Gould // Developments of PVC Technology. — Chapt. 9. — London, 1973. — P. 131–144.
104. Kiessling G. G. Экструзия интегральных пенопластов / G. G. Kiessling // J. Cell. Plast. — 1976. — Nov./Dec. — P. 337–341.
105. Borth R., Topf S. Рецептуры и способы получения профилей из жесткого пено-ПВХ. «Plastverarbeiter», 1978, Bd. 29, № 10, s. 538–539.
106. Hodgson T. C. Аналитический контроль процесса химического вспенивания полимеров / T. C. Hodgson, D. Carefoot, P. Samgat // Journ. Cell. Plast. — 1973. — V. 9. — № 6. — P. 274–278.
107. Voelker M. J. Конструкции головок и техника экструзии пено-ПВХ / M. J. Voelker // Polym. Plast. Technol. Engn. — 1976. — V. 6. — P. 235–242.
108. Пенополиэтилен, его свойства и применение / А. И. Ларионов, Г. Н. Матюхина, К. А. Чернова и др.; ЛДНТП. — Л., 1973.

7.10. Наполненные полимеры

109. Влияние парафинов на свойства композиции термопластичный полимердисперсный эластичный наполнитель / О. А. Серенко, М. Ю. Вдовин, А. А. Титова и др. // Высокомолекулярные соед. Сер. А. — 2000. — Т. 42. — № 3. — С. 462–467.
110. Неизотермическая кристаллизация полиэтилена низкой плотности, наполненного порошком резины / О. А. Серенко, Т. Е. Гороховская, А. А. Крючков и др. // Высокомолекулярные соед. Сер. Б. — 2000. — Т. 42. — № 8. — С. 1437–1440.
111. Влияние характеристик ПЭНП на свойства резинопластов / О. А. Серенко, В. С. Авинкин, А. А. Крючков и др. // Пластич. массы. — 2000. — № 9. — С. 12.
112. Влияние сополимера этилена с винилацетатом на деформационные свойства композиции ПЭНП–эластичный наполнитель / О. А. Серенко, В. С. Авинкин, М. Ю. Вдовин и др. // Высокомолекулярные соед. Сер. А. — 2000. — Т. 42.
113. Поливинилхлоридные пластмассы, наполненные природными силикатами и алюмосиликатами: Резюме по НИР «Наполненные поливинилхлоридные пластмассы» / Иркутский институт органической химии. — Иркутск, 1995.
114. «Direct extrusion» turns processors into compounders // Modern Plastics. — 2001. — Sept. — P. 69, 71.
115. Коваль В. В. Экструзия строительных профилей по технологии «жидкое дерево». Fasalex. «Строительство и недвижимость», 2000 / В. В. Коваль // <http://www.nestor.minsk.by/sn>.

116. Кауфман Ю. «Жидкое дерево» — строительный материал нового поколения / Ю. Кауфман // Полимерные материалы. — 2000. — № 6. — С. 2–3.
117. Смутка Ф. Древесная экструзия — новая технология, компания «Технопласт», Австрия / Ф. Смутка // Окна и двери. — 2003. — № 5.
118. Юрыгин О. С. Экструдированные подоконники (фирма «Технопласт», <http://www.technoplast.ru>), август 2002 // <http://www.tybet.ru>.
119. Коваль В. В. Новые полимеры для экструзии строительных профилей / В. В. Коваль // <http://www.build.ru/>.
120. ООО «Технолист», Самара // <http://www.narod.yandex.ru>.

7.11. Термоэластопласты

121. Кербер М. Л. Термоэластопласты / М. Л. Кербер. — Энциклопедия полимеров. Т. 3. — М.: Советская энциклопедия, 1977. — С. 638–641
122. Яруллин Р. Обзор мирового и отечественного рынка термоэластопластов // Р. Яруллин // The Chemical Journal. — 2003. — № 1. — С. 46–47.
123. Уплотнительные строительные профили из эластомеров-TPE. WEB Site Лучшие европейские экструзионные линии и фильеры // <http://www.extrusion.ru>.
124. ТУ2243-154-00300209-2001 «Композиция ТЭП на основе дивинилстирольного каучука и полистирола» // Воронежский филиал НИИ синтетического каучука (ВФ НИИСК).
125. На ОАО «Уралхимпласт» разработали новую группу термоэластопластов // <http://gsc.ru>.
126. Кабели с изоляцией из композиций на основе термоэластопластов. На сайте «Московского кабельного завода ЗАО «НФ Электропривод» / В. Н. Милованов, Ю. В. Навроцкий, И. А. Степанова и др. // <http://www.electroprovod.ru>.
127. Милованов В. Н., Навроцкий Ю. В., Степанова И. А. и др. Кабели с изоляцией из композиций на основе термоэластопластов. — Кабели и провода. — 2001. — № 2.
128. Santoprene. Linear Limited introduces environmentally responsible, TPV window and door seals. WEB Site Advanced Elastomer Systems. <http://www.santoprene.com>.
129. Производство профильных изделий из полимеров. Уплотнители из эластомеров. WEB Site ООО «АнКер». <http://www.anker-m.ru>.
130. Термоэластопласт Hytrel // <http://home.ptt.ru/technopol/>.
131. Блинов В. С. ЗАО «Уралэластотехника». Уплотнители из термоэластопластов для оконных систем / В. С. Блинов // Окна и двери. — 2003. — № 1.
132. Уникальная технология, уникальные материалы. ООО «Барс-профиль» // <http://user.rol.ru/~uplotnit>; <http://profile.da.ru>
133. Уплотнители из ТЭП Владимирского электромоторного завода. WEB Site ВЭМЗ. <http://www.vemp.ru>.
134. Экструзия ТЭП // <http://www.strictly-extrusion.com/hte/TPE.HTM>
135. Desmopan. Thermoplastisches Polyurethan-Elastomer. Die Technische Information. Bestell-Nr DD5968 (Производство, применение и переработка), Bestell-Nr DD 5969 (Физические и электрические свойства). Bayer, 1971, Nr D77-8116/845624, 1986, July.
136. Эластоллан. Термопластичные полиуретан-эластомеры. Продукт с превосходным комплексом свойств. Свойства и переработка. Фирма Elastogran группа BASF // Техническая информация фирмы № 136-6-92/R, 163-9-92.
137. ТУ 6-55-221-1512-98 «Полиуретан термопластичный Витур ТМ-1933-90» / ВНИСС. — Владимир, 1998.

7.12. Проблемы при экструзии профилей

138. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс / Г. Шенкель; Пер. с нем. — Л.: ГНТИ Хим. литературы, 1962.
139. Яковлев А. Д. Технология изготовления изделий из пластмасс / А. Д. Яковлев — Л.: Химия, 1968.

140. Экструзия / Под ред. В. А. Брагинского. — Л.: Химия, 1960.
141. Проблемы в работе приводного двигателя экструдера, возможные причины и способы устранения. // <http://www.strictly-extrusion.com/hte/>
142. Проблемы в работе экструдера, возможные причины и способы устранения // <http://www.strictly-extrusion.com/hte/>

7.13. Техника безопасности

143. Вредные вещества в промышленности: Справ. — Л.: Химия, 1976. — С. 525.
144. ГОСТ 26996-86 Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия.
145. ТУ 2214-019-00203521-96, ТУ 2214-006-05762341-97, ТУ 2214-011-05762341-97, ТУ 2243-021-05762341-2000 Пластики акрилонитрилбутадиенстирольные (АБС). ОАО Узловское ПО «Пластик», 1997.
146. ГОСТ 28250-89 Полистирол ударопочный. Технические условия.
147. ГОСТ 20282-86. Полистирол общего назначения. Технические условия
148. ГОСТ 14332-78. Поливинилхлорид суспензионный. Технические условия.
149. ГОСТ 22648-77. Пластмассы. Методы определения гигиенических показателей.
150. Коваль В. В. Экологические свойства ПВХ / В. В. Коваль // <http://www.nordeks.ru>
151. Вольфсон С.А. Внимание! Этиленпропиленовый каучук выходит на первое место / С. А. Вольфсон // Пластические массы. — 1999. — № 4. — С. 6–8.

ГЛАВА 8. ЭКСТРУЗИЯ ПРОФИЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

8.1. Экструзия «массивных» профилей, стержней, плит

8.1.1. Введение

Термином «массивные» называют сплошные или полые профили с большой толщиной стенки, которые чаще всего используются в качестве заготовок для изготовления деталей механической обработкой. В ряде случаев некоторые массивные профили используют без дополнительной обработки.

Производство массивных профилей сопряжено с определенными трудностями. Вследствие низкой теплопроводности полимерных расплавов время охлаждения изделия при формовании может быть значительным, что ограничивает линейную скорость экструзии. Для особо массивных профилей она может снижаться до нескольких сантиметров или даже миллиметров в минуту, если не предусмотрено специальных мер, направленных на интенсификацию процесса охлаждения и повышение производительности. Кроме того, быстрые усадочные явления, протекающие при охлаждении «толстой» заготовки, могут вызывать образование в изделии раковин или пустот, форма и размеры которых меняются произвольным образом при изменении условий экструзии. Такие дефекты особенно характерны для стержней и плит из кристаллизующихся полимеров, для которых объемная усадка обычно выше, чем для аморфных.

В настоящее время во многих странах успешно освоено производство стержней и плит широкой номенклатуры. Однако технологической информации по этому вопросу мало. В некоторых работах делается попытка теоретически рассмотреть процесс формования, обосновать появление усадочных раковин, установить границы процесса получения качественных изделий. Однако таких работ еще мало, поэтому многие вопросы экструзии массивных профилей приходится решать эмпирически.

В России серийное производство стержней и плит широкой номенклатуры отсутствует, хотя имеются установки для получения некоторых видов стержней, тол-

стостенных труб и других «массивных» изделий. Обзор состояния производства толстостенных профилей и стержней, возникающие проблемы и пути их решения приведены в [1].

8.1.2. Применение «массивных» профилей

Толстостенные профили, стержни, трубы цилиндрической, шестигранной, квадратной форм часто используются как полуфабрикаты для изготовления пластмассовых втулок, болтов, гаек, шестеренок, звездочек и других деталей технического и бытового назначения. Например, западногерманская фирма *Gehr* производит цилиндрические стержни диаметром от 5 до 500 мм, толстостенные трубы от $\varnothing 15 \times 5$ (наружный \times внутренний диаметр) до $\varnothing 500 \times 100$ мм из ПЭВП, ВМПЭ, НПВХ, ПОМ, ПА и др. полимеров, а также прямоугольные, квадратные, шестигранные и другой формы стержни из жесткого ПВХ [2]. Шестигранные или квадратные стержни могут использоваться для изготовления из них болтов с головками «под ключ» и соответствующих гаек, которые могут использоваться как в технических целях, так и для бытовых нужд (например, в детских конструкциях, в малонагруженных конструкциях и т. д.).

Полуфабрикаты (трубы, листы, стержни, блоки) из тепло- и атмосферостойкого поливинилиденфторида (ПВДФ) выпускает фирма *Simona*, ФРГ [3]. Трубы из ПВДФ могут работать под давлением до 16 атм при нормальной температуре и под давлением 3,5 атм при 140 °С. Материал имеет морозостойкость до -40 °С, теплостойкость до +150 °С и хорошую атмосферостойкость. Фирма производит также стержни $\varnothing 20$ –500 мм, блоки толщиной до 400 мм и экструдированные листы толщиной 2–10 мм. На основе этого материала готовят сэндвич-конструкции для облицовки зданий в условиях повышенной солнечной активности.

Для производства пластмассовых деталей (шестерен, накидных гаек, болтов, других крепежных деталей, колец) могут использоваться полупродукты (стержни, трубы, плиты, блоки) из полиамидов и полиацеталей, производимые западногерманской фирмой *Pleiger* [4]. Размеры полуфабрикатов приведены в табл. 8.1.

Эти материалы обладают повышенной жесткостью, ударопрочностью, низким водопоглощением (особенно ПА-12 и ПОМ), сравнительно высокой теплостойкостью (70–130 °С). Полиоксиметилен имеет, кроме того, высокую износостойкость, малую ползучесть и стабильность размеров, что позволяет использовать этот материал для изготовления деталей, работающих под нагрузкой длительное время. В некоторых

Таблица 8.1. Полуфабрикаты фирмы *Pleiger*, ФРГ [4]

Материал	Стержни	Плоские блоки	Листы	Толстостенные трубы
ПА-6	5–300	8–100	0,3–6	25–300
ПА-66	6–180	8–60	–	30–250
ПА-12	6–200	10–50	–	30–260
ПОМ	5–250	8–80	0,5–6	25–300

Примечания. Наружные размеры в мм для изделий. ПА — полиамиды; ПОМ — полиоксиметилен (полиацеталь).

странах (например, в Японии) полиоксиметилен используют для изготовления деталей видеотехники. Так, стойки $\varnothing 6$ мм, работающие в контакте с видеопленкой, по сравнению с фторопластовыми деталями обладают большей долговечностью и обеспечивают более качественное воспроизведение изображения и звука. Однако к деталям предъявляются высокие требования по точности и чистоте обработки, которые не могут быть достигнуты непосредственно в экструзионном процессе. Так, для стержня $\varnothing 8$ мм фирма *Pleiger* гарантирует допуски: верхний +0,5, нижний +0,1 мм, тогда как точность изготовления стоек должна быть соответственно +0,4 и +0,2 мм. Это достигается последующей механической обработкой на специальном оборудовании.

Широкую номенклатуру «массивных» полуфабрикатов представляет российская фирма ООО «Капролон» [5]. Это главным образом стержни и плиты из ПА, ПОМ, ВМПЭ, СВМПЭ, ПБТФ и др. В табл. 8.2 приведены размеры стержней и плит из высоко- и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наиболее часто используемых для изготовления разнообразных изделий методом механической обработки.

8.1.3. Технология получения массивных профилей

Как уже указывалось выше, при быстром охлаждении толстостенных профилей, особенно сплошных, в его толще образуются усадочные раковины. Особенно часто и заметно этот дефект проявляется при экструзии кристаллизующихся полимеров, для которых объемная усадка при охлаждении выше, чем для аморфных [6]. Пустоты или раковины могут образовываться из-за ограничения объемной усадки полимера, так как при охлаждении расплава наружная оболочка затвердевает в первую очередь, вызывая соответствующее сжатие внутреннего «ядра». В зависимости от интенсивности охлаждения и внешних воздействий на охлаждаемый экструдат сжатие во внутренней зоне может вызвать образование пустот. Причины, механизм этого явления и патентные решения проблемы рассмотрены в [1].

В настоящее время толстостенные профили простой формы и стержни экструдируют с малой скоростью через экструзионные головки, состоящие из трех характерных участков: участка входа диаметром 8–10 мм независимо от размера профиля, переходного конического участка с углом конуса до 45° и формующего участка с постоянным поперечным сечением (рис. 8.1) [7].

Формующий участок является одновременно и калибрующим устройством. Толщина стенок рубашки охлаждения должна быть достаточно большой, чтобы противостоять высокому давлению, возникающему при заполнении расплавом калибрующе-

Таблица 8.2. Размеры полуфабрикатов из ВМПЭ и СВМПЭ

	Стержни	Плиты
<i>Полиэтилен высокомолекулярный (PE-HMW)</i>		
Размеры	$\varnothing 20-200$	8–150
<i>Полиэтилен сверхвысокомолекулярный (PE-UHMW)</i>		
Размеры	$\varnothing 20-240$	1–150

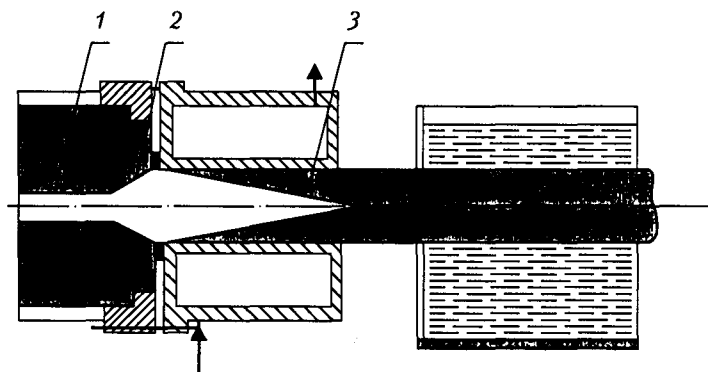


Рис. 8.1. Схема формирования сплошных стержней [7]:
1 — зона расплава; 2 — зона расширения (переходный участок);
3 — зона охлаждения (формирующий участок)

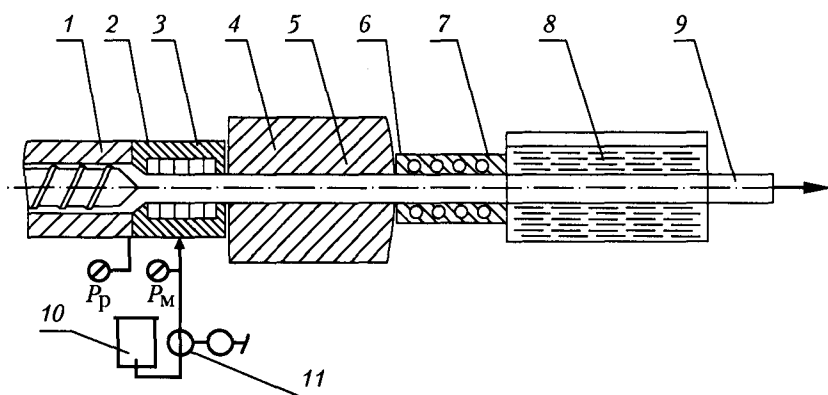


Рис. 8.2. Схема формирования стержня со смазкой [8]:

1 — экструдер; 2 — адаптер экструзионной головки; 3 — пористая втулка; 4 — формирующий инструмент;
5 — смазка; 6 — теплоизолирующая прокладка; 7 — калибрующее устройство; 8 — охлаждающая ванна;
9 — профиль; 10 — емкость с маслом; 11 — масляный насос; P_p — давление расплава на входе в головку;
 P_m — давление масла

го канала. Длина охлаждаемого участка должна обеспечивать охлаждение наружных слоев профиля и его формоустойчивость при реализуемых скоростях отвода изделия. При экструзии необходим контроль и регулирование давления массы в пределах 10–125 атм. Для уменьшения трения стенки калибратора покрывают фторопластом [7] или изготавливают из пористого материала, через который подают смазку шестеренчатым насосом непосредственно в расплав полимера перед входом в формирующую часть головки [8] (рис. 8.2).

Экструзия стержней с малой линейной скоростью для предотвращения образования усадочных пустот и раковин с последующей термообработкой в газовой или жидкой среде рекомендуется для толстостенных изделий из полиакрилатов [9], полиами-

дов [10], полиацеталей [11]. Например, изготовление стержней из полиакрилатов рекомендуется осуществлять с помощью фильер, длина цилиндрической части которых в 8–10 раз больше диаметра отверстия, при температуре расплава не выше 150°C и низкой линейной скорости отвода. Для получения стержней из полиамидов диаметром более 3 мм требуется медленное охлаждение под давлением. Экструзию стержней из полиацеталей осуществляют при производительности не выше 7–9 кг/час [11]. Для увеличения производительности рекомендуют многоканальные головки. Давление в головке необходимо обязательно контролировать и при необходимости регулировать с помощью соответствующих устройств. Для уменьшения времени охлаждения температуру расплава полиацеталей следует выбирать по возможности низкой. Для полиацеталей типа Хостаформ С2521 и С2550 температура расплава должна быть в пределах $180\text{--}185^{\circ}\text{C}$.

Для устранения повышенной хрупкости в результате неравномерного охлаждения слоев толстостенного профиля рекомендуется термообработка в воздушной (или в среде азота) или жидкой среде (масла, воски) при температуре 140°C и выдержке в течение 10 мин на каждый миллиметр толщины стенки профиля. Нагрев и охлаждение стержня в печи следует проводить медленно, например, круглый стержень диаметром 100 мм отжигают 1000 мин (16 ч 40 мин), при этом нагрев печи составляет 3 ч 20 мин, охлаждение — 6 часов, общее время термообработки — 26 ч.

8.1.4. Качественная модель процесса формования стержней

8.1.4.1. Процесс охлаждения

Для того чтобы управлять технологическим процессом, необходимо понимать его сущность и иметь математическую модель, учитывающую основные особенности процесса. Опубликовано большое количество работ по вопросам охлаждения полимеров при экструзии и литье под давлением. Большинство из них рассматривает стационарный процесс охлаждения изделия после заполнения расплавом литейной формы или на длине калибрующего устройства при экструзии.

Процесс заполнения литейной формы или теплофизические процессы на участке входа в калибратор относятся к нестационарным процессам как во времени, так и в пространстве. Трудность проверки предлагаемых теоретических расчетов процессов охлаждения объясняется недостатком надежных методов экспериментального определения температуры материала вдоль пути охлаждения и зависимость теплофизических характеристик расплавов от температуры. И только с разработкой приемлемых математических моделей охлаждения, учитывающих основные особенности процесса экструзии и литья под давлением [6, 12–27], стали появляться прикладные компьютерные программы для моделирования реальных процессов. Ниже мы рассмотрим одну из таких моделей применительно к охлаждению цилиндрического стержня в охлаждаемой части головки по схеме, показанной на рис. 8.1.

В [6, 12] рассматривается стационарный процесс охлаждения и кристаллизации движущегося в круглом канале расплава полукристаллического полимера. Модель [12] основана на совместном решении уравнений неразрывности, движения и энергии, записанных как для жидкой, так и твердой фаз полимера, уравнений сохранения массы и реологического уравнения расплава. Решение системы уравнений с учетом

соответствующих начальных и граничных условий позволяет аналитически определить координаты начала фронта кристаллизации расплава и профиль кристаллизующегося расплава во времени.

Процесс охлаждения сплошного изделия по физической сущности аналогичен процессу заполнения литейной формы при малой скорости. В литье под давлением эта стадия носит больше познавательный характер, чем практический. При экструзии же эта стадия определяет производительность процесса и качество экструдированного изделия, поэтому от точности модели зависит выбор оборудования и оснастки.

Исследования движения полимера в различных по конфигурации формах с помощью визуальных наблюдений, фотографированием, киносъемками в формах с прозрачными стенками, введением подкрашенных трассеров в прозрачный материал показывают, что траектории отдельных слоев расплава параллельны общему направлению движения [13, 14]. На протяжении всего периода заполнения в движении слоев не происходит каких-либо нарушений. В результате процесса теплопередачи от горячего расплава к холодной форме на стенках ее внутренней полости образуется охлажденный слой высоковязкого полимера, который в течении не участвует. Расплав течет внутри канала, образованного неподвижными затвердевшими слоями. По мере заполнения формы толщина пристенного слоя в поперечных сечениях уже заполненной ее части постепенно возрастает.

При движении с малой скоростью расплава через охлаждаемый калибратор толщина охлажденного слоя может достигнуть половины диаметра стержня. В этом случае продолжающий поступать в головку расплав сталкивает образовавшуюся пробку, и возникает стационарное осевое перемещение охлажденного стержня. При недостаточном времени охлаждения происходит «прокалывание» в слабой области стержня, поступающий расплав распирает его оболочку, в результате чего на поверхности контакта возрастают силы трения, суммарное значение которых превышает толкающее усилие, и поступательное движение стержня прекращается. Таким образом, при экструзии массивного сплошного стержня (или сплошного профиля произвольного сечения) необходимо определить время охлаждения, при котором возможен устойчивый процесс «толкания» изделия поступающим в головку расплавом при заданной производительности экструдера.

Поскольку расплав должен охладиться в калибраторе полностью до температуры ниже температуры кристаллизации $T_{кр}$, необходимо организовать процесс экструзии таким образом, чтобы интенсивность охлаждения была достаточно высока, а напряжения сдвига в центральных слоях, являющиеся функцией общего давления выдавливания, не слишком большие. Это связано с тем, что при резком охлаждении поверхностных слоев и сравнительно медленном — центральных слоев из-за плохой теплопроводности расплава в изделии возникают значительные внутренние напряжения, вызывающие проблемы при эксплуатации изделий и даже их разрушение.

Ясно, что с повышением температуры экструзии продолжительность охлаждения изделия увеличивается. Скорость охлаждения определяется величиной коэффициента температуропроводности. Чем выше этот коэффициент, тем интенсивнее охлаждение. Кристаллизующиеся полимеры охлаждаются быстрее, чем аморфные, причем тем более, чем выше степень кристалличности материала. Например, для охлаждения изделия толщиной 4 мм из ПС требуется 250 с, из ПЭ — 130 с, полиамида — 100 с.

Для изделия толщиной 6 мм эти значения соответственно составляют 500, 300 и 240 с [1], следовательно, прямой пропорциональности между толщиной стенки и временем охлаждения нет.

Значения коэффициентов температуропроводности для некоторых аморфных и кристаллизующихся полимеров в широком диапазоне температур приведены в [25, 26]. Например, для ПА 6,6 коэффициент температуропроводности практически постоянен в диапазоне температур 20–110 °С и составляет 0,09 мм²/с, для ПП слабо снижается с 0,07 до 0,06 в диапазоне температур 10–90 °С. Для ПЭВП и ПФА эта зависимость более ярко выражена: для ПФА температуропроводность практически линейно уменьшается с 0,08 при $T = 20$ °С до 0,04 мм²/с при 120 °С.

Для решения задачи об охлаждении цилиндрического стержня используют уравнение нестационарной теплопроводности в одномерной форме и в цилиндрических координатах. Соответственно для толстостенной пластины приходится использовать уравнение в двухмерной форме в прямоугольных координатах.

Для упрощения математических расчетов вводят определенные допущения:

- теплопередачей в направлении течения пренебрегают из-за ее незначительного влияния на процесс охлаждения;
- параболический профиль распределения скорости течения расплава в канале формирующего элемента заменяют плоским;
- пренебрегают конвективной теплопередачей при охлаждении в форме;
- пренебрегают диссипативными тепловыделениями в потоке расплава;
- коэффициент температуропроводности определяют с учетом теплоты плавления [13, 25].

В общем случае коэффициент температуропроводности определяют по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}. \quad (8.1)$$

Здесь теплофизические характеристики теплопроводности λ , плотности ρ и теплоемкости C_p являются функциями температуры в диапазоне, где эта функция непрерывна.

Процесс охлаждения расплава в калибраторе разделяют на две стадии. Первая стадия начинается с момента касания экструдатом холодной стенки калибратора и начала теплообмена и заканчивается в момент затвердевания расплава на оси стержня. На второй стадии температура полимера по всему сечению стержня ниже температуры кристаллизации, и температура в каждой точке снижается по мере продолжительности охлаждения. Переход от первой ко второй стадии характеризуется критическим значением критерия Фурье [13].

Для реализации толкающей технологии экструзии стержня время охлаждения и критическое значение критерия Фурье рассчитывается в диапазоне температур от температуры расплава на входе в калибратор до температуры кристаллизации при толщине стенки, равной половине диаметра стержня. Это время — минимальное, при котором процесс толкания возможен. Кроме того, нужно учесть силовой фактор, а именно определить минимальное значение модуля упругости материала в какой-либо минимальной цилиндрической области, при котором не будет «пробоя», в результате которого продольное движение стержня прекратится. Поскольку все характеристи-

ки материала и режимы охлаждения тесно взаимосвязаны, решение неоднозначно и может находиться только численными методами

Трудность такого расчета обусловлена еще и усадочными явлениями в материале, которые уменьшают диаметр стержня и нарушают интенсивность теплообмена, что, в свою очередь, увеличивает время охлаждения. С другой стороны, при отсутствии усадки движение стержня будет зависеть от соотношения толкающей силы и силы трения по поверхности контакта стержня с калибратором. Идеальный случай соответствует условию, когда толкающая сила $P_{ос} \geq F_{тр}$ по всей длине калибратора ($F_{тр}$ — сила трения). Следовательно, необходимо задать такой темп охлаждения, чтобы температура в центральной области стержня была бы достаточно низкой для обеспечения поступательного движения стержня, но и не слишком низкой, чтобы не препятствовать продольному сжатию стержня и увеличению его диаметра на величину термической усадки; отклонение в обе стороны нежелательно. Если сжатие велико, то движение сильно тормозится, и может наступить пробой центральной области из-за нарушения указанного выше условия. При интенсивном охлаждении термические усадочные напряжения снижают диаметр стержня больше допустимого значения, ухудшая теплообмен, вызывая неравномерное касание стержнем стенок калибратора и, как следствие, искривление стержня, ухудшение качества поверхности.

В итоге приходится решать следующие задачи:

1. Охлаждение стержня до температуры кристаллизации на оси на основе численного решения уравнения нестационарной теплопроводности при заданных граничных и краевых условиях и определение длины расплавленного конуса.
2. Определение радиальной усадки стержня в момент достижения на оси стержня температуры кристаллизации.
3. Силовую задачу сжатия стержня силой трения для компенсации величины радиальной усадки.

Для решения первой задачи предполагается, что теплофизические характеристики материала зависят только от температуры, и на них не влияют условия контакта стержня с охлаждаемым металлом калибратора.

Вторую задачу приходится решать по тонким слоям, принимая для каждого слоя среднюю температуру известной (определенной в первой задаче) и рассчитывая термическое сокращение толщины при известной зависимости коэффициента термического расширения от температуры, а после суммируя сокращения толщин по всему радиусу.

На третьей условной стадии решаем обратную задачу увеличения толщины каждого кольцевого слоя на толщину термической усадки. Суммарную силу трения рассчитываем из условия идеального контакта между стержнем и калибратором по всей длине. Необходимые для расчета силы трения и нормальные силы определяем в предположении, что давление в жидкой части конуса одинаково во всех точках, а нормальная сила действует по поверхности жидкого конуса (предполагаем, что образующие конуса — прямые линии, хотя в действительности они представляют собой вытянутую параболу). Допущение об усредненной сосредоточенной нормальной силе довольно условно, поскольку очевидно, что нормальные силы и, соответственно, силы трения максимальны в начале конуса и уменьшаются к его вершине, но для первого приближения такое усреднение можно допустить.

Другая сложность состоит в неопределенности коэффициента трения охлажденного контактного слоя по металлу. Он зависит не только от температуры, но и от удельного давления, состояния обработки поверхности трения, скорости относительного перемещения. Для простоты принимаем в первом приближении зависимость коэффициента трения только от средней температуры поверхности стержня на длине охлаждения. При известной температурной зависимости коэффициента трения материала по стали можно рассчитать силы трения на поверхности каждого элементарного кольцевого цилиндра и проследить изменение силы трения по мере охлаждения стержня.

Для того чтобы компенсировать радиальную усадку охлажденных слоев, нужно сжать элементарный кольцевой цилиндр с конической внутренней поверхностью настолько, чтобы увеличение его наружного диаметра было в точности равно радиальной усадке. Для этого нужно знать действующие на цилиндр сжимающие силы, модуль упругости материала в охлажденной части и коэффициент Пуассона, полагая, что деформация сжатия носит упругий характер.

Как видно, даже для такой упрощенной модели расчет весьма сложный и трудоемкий, поскольку нужно иметь много данных по теплофизическим и механическим свойствам материала в зависимости от температуры, профиль изменения которой также должен определиться в этой задаче, поэтому такие задачи решаются методом последовательных приближений с использованием метода сеток. Этот метод применялся в большинстве математических моделей, о которых упоминалось выше.

В рассмотренной качественной модели не упоминается эффект кристаллизации и сопровождающие его явления, поскольку это еще более усложняет математическую модель процесса охлаждения.

Как уже указывалось выше, при экструдировании массивных сплошных полимерных профилей в них могут образовываться пустоты вследствие быстрого охлаждения, что является следствием объемного сжатия внутренней зоны при затвердевании внешней оболочки. Эти пустоты появляются лишь при скорости охлаждения выше критической, и их появление зависит от влияния вязкости полимера, диаметра стержня, давления экструзии [6].

Практика показывает, что пустоты бывают либо сплошными нитеподобными, либо в виде периодических сфер. Опыт работы автора показывает, что пустоты в виде раковин произвольной формы (с плавными очертаниями) и с произвольным расположением вдоль оси прутка образуются даже при сравнительно медленном (на воздухе) охлаждении стержня из полукристаллического ПЭВП. С увеличением интенсивности охлаждения размер раковин и частота их повторения возрастают. В работе [6] сообщается, что пустоты для полимеров с вязкостью в пределах от $4 \cdot 10^4$ до $1,5 \cdot 10^7$ пз (диаметр стержня 3,7 и 6,2 мм) отсутствовали при низких скоростях охлаждения и всегда наблюдались при высоких скоростях. Для низковязких полимеров пустоты преимущественно нитевидные, для высоковязких — сферические.

Авторы объясняют появление пустот следующим образом. В области затвердевания полимера образуется конический фронт с твердыми границами, стационарный в пространстве для заданных условий экструзии. Длина конического фронта вдоль продольной оси пропорциональна скорости движения прутка. Если границы затвердевания неизменны, то увеличение интенсивности охлаждения вызывает уменьше-

ние давления внутри жидкой полости. Поскольку жидкая полость соприкасается с твердой частью охлажденного полимера, то в ней возникает компенсирующее течение, зависящее от разности возникающих напряжений в твердой и жидкой областях.

В зависимости от вязкости полимера и размеров полости компенсирующее течение может быть достаточным для компенсации отрицательного давления в полости. В этом случае пустоты не будут образовываться. В остальных случаях происходит образование пустот, рост размеров которых инициируется дальнейшим уменьшением давления, наблюдающегося в направлении вершины конуса, и сдерживается вязким сопротивлением среды. Для ПЭ отношение длины конуса к диаметру его основания находится в пределах от 7 до 35 в зависимости от скорости движения стержня. Эти величины довольно значительны, что объясняет частое нарушение стационарного процесса при изменении некоторых условий охлаждения. Поверхностное натяжение в полимере затрудняет образование пустот, но оно мало по сравнению с давлением, и его влиянием на образование пустот пренебрегают.

Приведенный в [6] теоретический анализ удовлетворительно совпадает с экспериментом для низковязких полимеров и значительно хуже для высоковязких. Однако теория качественно правильно предсказывает образование и рост пустот в зависимости от параметров технологического процесса. Таким образом, можно дать некоторые практические рекомендации по экструзии массивных профилей.

1. Проще всего экструдировать стержни и плиты из жестких кристаллизующихся термопластов с высокой скоростью охлаждения и высокой термической усадкой, например, из ПЭВП, ПФА, некоторых типов полиамидов.
2. При выборе производительности экструдера для изготовления массивного изделия необходимо предварительно промоделировать процесс охлаждения и определить максимальные линейные скорости экструзии. Для безопасности экструдер должен быть оснащен датчиками контроля осевого давления или давления в головке, нагрузки на приводной двигатель или крутящего момента на шнеке.
3. При экструзии стержней и плит большого размера в начальный период используют торможение расплава в калибраторе до заполнения сечения и образования охлажденной пробки.
4. Работу тянущего устройства (если оно используется) нужно строго синхронизировать со скоростью выхода профиля из калибратора, не допуская торможения или вытяжки профиля из калибратора и изменения условий охлаждения. Для этой цели лучше использовать ленточный транспортер, поддерживающий выдавливаемый профиль без его прижатия к ленте, и подбирая скорость движения ленты вручную в соответствии со скоростью движения профиля.
5. В охлаждаемой части головки не допускаются сужения сечения, в которых расплав может охладиться до образования пробки. Между обогреваемой и охлаждаемой частями головки обязательна теплоизолирующая прокладка из жесткого материала с внутренними размерами, равными размерам калибратора, что позволит избежать затекания расплава в зазор и исключить остановку процесса по этой причине.
6. При использовании многоканальных головок необходимо предусмотреть меры для обеспечения одинаковых условий охлаждений каждого канала, иначе не-

которые каналы могут закупориваться пробками и перестать работать. В многоканальных головках каналы лучше размещать в горизонтальной плоскости, применяя способы выравнивания скоростей течения по ширине по типу широкощелевых головок. Охлаждаемая часть головки должна быть быстроръемной и крепиться к основной части с помощью средств, рассчитанных на высокие осевые усилия (в некоторых случаях — при экструзии сплошных стержней небольшого диаметра — до нескольких тонн).

7. Для термообработки экструдированных профилей (в случае необходимости) следует изготовить печь с регулируемой температурой нагрева и пенами для размещения профилей. Профили при нагреве и охлаждении должны иметь возможность свободного перемещения по длине и крайне ограниченного в поперечном направлении.
8. Непрерывный контроль пустот при экструзии можно проводить ультразвуковыми, рентгеновскими и другими методами или визуализацией образцов сечений вручную.

8.2. Производство профилей из пено-ПВХ

Значительную долю производства профильных изделий из термопластов составляют профили из вспененных материалов и, в первую очередь, из композиций на основе жесткого пено-ПВХ. Для вспененных изделий характерна устойчивость к гниению и воздействию микроорганизмов, относительно высокие механические свойства, малая масса и невысокая стоимость. Если профили используются как полуфабрикат, то для их дальнейшей обработки применяют обычные деревообделочные и металлорежущие станки и проводят такие операции, как распиловка, строгание, фрезерование, сверление, выдалбливание и т. д. Соединение профилей может осуществляться при помощи гвоздей, шурупов, скобок, винтов, а также склеиванием. Профили из вспененных материалов имеют высокую жесткость и прочность на смятие [28].

Ассортимент профилей из пено-ПВХ обширен: сплошные и полые изделия различной конфигурации и с различной толщиной стенок, профили для обшивки стен, потолков, фасадов, плинтусы, отделочные планки, некоторые виды подоконников. Из пено-ПВХ изготавливают даже дверные панели, сплошные или полые с перегородками (в основном для межкомнатных дверей, душевых и гардеробных кабин). Более подробные сведения о дверных панелях приведены в разделе 8.4.1.

Многослойные трубы со вспененной сердцевинной в некоторых случаях постепенно вытесняют традиционные стальные трубы, так как им не нужна наружная теплоизоляция [29]. На рис. 8.3 приведены примеры профилей из пено-ПВХ.

В зависимости от применяемой технологии и конструктивного оформления оснастки возможно изготовление профилей с гладкой, матовой или шероховатой поверхностью. Некоторые производители наносят на поверхность пенопрофилей покрытие из мелкой гранитной или мраморной крошки (например, фирма *Dollken*, Германия), придавая фасадам зданий вид декоративной штукатурки [29]. Здания, облицованные такими профилями, «дышат», поскольку такая облицовка газопроницаема.

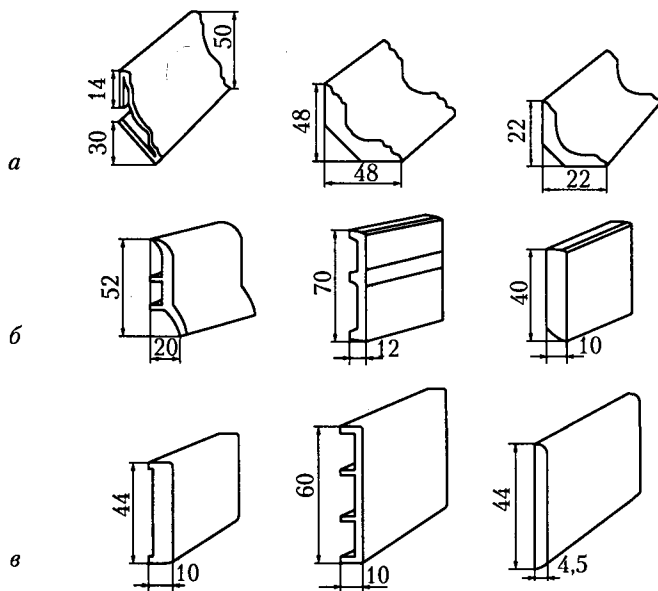


Рис. 8.3. Галтели (а), плинтусы (б), наличники и планки (в) из пено-ПВХ [31]

Вспененные профильные изделия, как правило, являются декоративно-отделочными и реже конструктивными, поэтому к ним, в первую очередь, предъявляются требования экономичности и возможности использования для их изготовления наиболее дешевых композиций и стандартных экструзионных линий с минимальными переделками. Большинство выпускаемых промышленностью жестких пенопрофилей производится по методу химического вспенивания и имеют плотность $0,5\text{--}1,2\text{ г/см}^3$ и толщину внешней монолитной оболочки $0,1\text{--}1\text{ мм}$. Основные характеристики вспененного ПВХ приведены в главе 7.

8.2.1. Методы производства вспененных профилей

Методы производства профилей и труб из вспенивающихся материалов рассмотрены в [28, 30] и в главе 7. Кратко напомним основные из них.

Процесс Celuka (фирма Kuhlman, Франция)

В основу процесса положены регулирование и контроль процесса вспенивания термопласта на выходе из головки специальной конструкции и охлаждение экструдата снаружи с помощью калибрующего устройства, установленного вплотную к головке. Калибрующее устройство имеет такие же размеры поперечного сечения, как и фильера (мундштук), поэтому вспенивание материала происходит внутрь. По этому методу можно получать профили различной конфигурации с монолитной поверхностью и жесткими допусками на размеры, поскольку материал подвергается сжатию в калибрующем устройстве до тех пор, пока форма профиля не стабилизируется.

Процесс Gedal (фирма CdF Chemie, Франция)

Оборудование для производства вспененных профилей по методу *Gedal* по сравнению со стандартным требует лишь незначительных переделок в конструкции экструзионной головки и контроле процесса вспенивания. Вспенивание экструдата осуществляется на выходе из фильеры, сечение которой к выходу непрерывно сужается. Особенностью процесса является строгий контроль за изменением размеров при вспенивании в направлениях перпендикулярных оси экструзии.

Процесс позволяет получать облегченные профили высокого качества с плотностью $0,5\text{--}1,2\text{ г/см}^3$ из различных термопластов на стандартном экструзионном оборудовании.

Процесс Goodrich (фирма Goodrich, США)

Этот процесс мало отличается от обычного процесса экструзии труб и профилей из термопластов. Вспенивание экструдата осуществляется на выходе из головки. Далее экструдат попадает в вакуумную ванну, в которой установлена калибрующая втулка или пластины. Непосредственное охлаждение экструдата водой интенсифицирует процесс образования твердой гладкой корки, толщина которой составляет $0,1\text{ мм}$ и более. Качество поверхности профиля несколько хуже, чем у изделий, полученных по методу *Celuka*, однако данный способ производства более доступен, так как предусматривает использование стандартного оборудования и не требует затрат на приобретение отдельных запатентованных устройств и приспособлений.

Процесс позволяет получать профильные изделия открытого типа сечением $0,5\text{--}4,50\text{ см}^2$ со скоростью отвода $3\text{--}12\text{ м/мин}$.

Производство труб и трубообразных вспененных профилей

Одним из основных процессов производства труб из пено-ПВХ является процесс *Armocell* фирмы *Armosig*, Франция. Для реализации способа применяются экструзионные головки высокого сопротивления, имеющие перед формующей частью специальную зону декомпрессии. По сравнению с традиционными головками для производства труб из НПВХ в данной головке на основе анализа течения вспененного материала изменены размеры некоторых деталей.

Вакуумное калибрующее устройство располагается, как обычно, на некотором расстоянии от головки, которое подбирается экспериментально.

Процесс позволяет получать трубы и трубообразные профили из любых известных вспенивающихся композиций ПВХ, количество порофора в которых находится в пределах $0,2\text{--}0,3\text{ в. ч.}$ Плотность экструдированных изделий составляет $0,8\text{--}0,9\text{ г/см}^3$.

8.2.3. Оборудование для производства вспененных труб и профилей

Типичная экструзионная линия для производства труб или профилей из пено-ПВХ, так же как и обычная линия, состоит из экструдера с системой загрузки материала, экструзионной головки с формующим инструментом для трубы или профиля, калибрующего устройства, охлаждающей системы, тянущего устройства, приспособления для резки и устройства для приемки готовой продукции. В некоторых линиях между охлаждающей ванной и тянущим устройством могут быть установлены маркирую-

щие устройства (например, на основе струйного принтера), автоматические толщиномеры и измерители длины, устройства для декорирования.

8.2.3.1. Экструдеры

Для производства труб и профилей из вспенивающихся ПВХ-материалов применяют одно- или двухшнековые экструдеры. Большинство профилей получают на экструдерах с диаметром шнека 45–90 мм. Диаметр шнека одношнекового экструдера можно подобрать в зависимости от площади поперечного сечения профиля: при площади сечения менее 5 см^2 — 30 мм; $5\text{--}10 \text{ см}^2$ — 45 мм, для $F > 10 \text{ см}^2$ D составляет 60–90 мм (F — площадь поперечного сечения профиля, D — диаметр шнека экструдера). Длина шнека должна быть не менее $20D$, более предпочтительны шнеки с длиной $24D$ и выше.

Для переработки пено-ПВХ на одношнековых машинах могут использоваться двух- или трехзонные шнеки со степенью сжатия 1,5–3,0. Длина зоны плавления для них достигает $10D$, а глубина канала в этой зоне может составлять до 10% от D . Длина зоны дозирования составляет 0...4 D . Наконечники шнеков должны быть такими же, как и для переработки обычных композиций НПВХ. Сечение канала в области наконечника не должно вызывать резких поворотов материала и резких перепадов давления.

Для переработки порошкообразных вспенивающихся композиций НПВХ применяют двухшнековые экструдеры. Они позволяют обеспечить однородное температурное поле расплава по сечению каналов формующего инструмента, что необходимо для равномерного вспенивания и постоянства плотности материала в изделии. При использовании двухшнековых экструдеров сопротивление головки практически не влияет на процесс пластикации, поэтому при изменении формующего инструмента требуется лишь минимальная корректировка режима экструзии.

Подача композиции для питания шнеков производится принудительно дозирующим шнеком. Предварительной подсушки композиции перед переработкой не требуется.

8.2.3.2. Системы охлаждения

Длина пути охлаждения вспененных профилей при экструзии больше, чем для монолитных материалов, так как теплопроводность пеноматериала значительно ниже. Охлаждение пенопрофилей после калибрования производят в охлаждающих ваннах погружением или разбрызгиванием воды из форсунок. Применение разбрызгивающих форсунок позволяет дифференциально охлаждать участки разнотолщинных профилей. В конце зоны охлаждения для устранения повышенной криволинейности профиля иногда устанавливают устройства для термообработки с помощью подачи горячего воздуха или с помощью инфракрасного излучения.

8.2.3.3. Тянущие устройства

Для отвода вспененных профилей используют траковые, ленточные или роликовые тянущие устройства с резиновыми накладками, обеспечивающими сохранность формы профиля при сжатии траков, лент или роликов. При использовании блоков «сухих» калибраторов эффективная длина зоны контакта с поверхностью профиля должна составлять не менее 700 мм.

8.2.3.4. Режущие устройства

Резка пенопрофилей при экструзии осуществляется быстроходными вращающимися дисковыми пилами с мелким зубом. Скорость резки достигает 15 м/мин. Для отбора пыли при резке необходима установка пылесборников.

8.2.3.5. Оборудование для декорирования

Для нанесения рисунка или печати на поверхность пенопрофилей используют обычные установки, применяющиеся при облагораживании монолитных изделий.

Принцип декорирования вспененных профилей такой же, как и для полуфабрикатов из дерева. Нанесение рисунка на поверхность профиля осуществляется машинами-трейнерами, позволяющими наносить печать с одной или с обеих сторон. Ширина нанесения печати на таких машинах 300–450 мм, скорость нанесения печати 20–45 м/мин. Участок декорирования лучше размещать в отдельном помещении, поскольку это уменьшит вероятность образования дефектов на поверхности профилей от пыли порошкообразных композиций.

8.2.3.6. Технологическая оснастка

Экструзионные головки. Головки для производства профилей из вспененных материалов можно условно разбить на три типа:

- для производства толстостенных профилей с толщиной стенки 3–15 мм;
- для производства тонкостенных, плоских и полых профилей;
- для профилей, состоящих из монолитного и вспененного слоев.

Головки для толстостенных профилей. Вход в головку рекомендуется выполнять относительно широким, поскольку при малом сечении канала могут возникнуть большие сдвиговые напряжения и наблюдаться повышение температуры расплава, что вызовет преждевременное вспенивание или разложение материала.

Использование решеток на входе в головку целесообразно только при производстве особо толстостенных изделий и низком давлении в головке, которое не может предотвратить преждевременное вспенивание материала. Во избежание застывания и разложения полимера отверстия на входе в решетку должны быть раззенкованы. Между концом шнека и решеткой не должно быть большого объема полости, поскольку в этом случае возможно налипание материала на рабочие поверхности каналов головки и его разложение.

Размеры формирующих каналов головок для изготовления профилей из вспенивающихся материалов должны учитывать одновременное проявление на выходе из головки разбухания экструдата и химического вспенивания, которые невозможно разделить и оценить вклад каждого из процессов. Они зависят от конструкции шнека, скорости экструзии, формы и размеров поперечного сечения профиля, рецептуры материала и способа калибрования. Гидравлическое сопротивление головки при проектировании следует подбирать из условия предотвращения вспенивания расплава в головке. Поскольку неизвестно, при каком фактическом давлении будет начинаться преждевременное вспенивание, то лучше с самого начала запроектировать повышенное сопротивление головки с возможностью его уменьшения после испытаний.

Таблица 8.3. Размеры формующего отверстия для прямоугольных участков профилей

Размер	Профиль, мм	Фильера, мм
Ширина B	12–32	0,6 B
	32–57	0,7 B
	57–83	0,8 B
Толщина h	3–13	0,5 h

Размеры отверстия следует принимать с учетом умеренного обжатия экструдата в калибрующем устройстве. Экспериментально установлено, что экструдат пено-ПВХ, выходящий из канала прямоугольного сечения, увеличивает толщину на 30–80% и ширину на 10–30%. В табл. 8.3 приведены рекомендуемые размеры формующего отверстия в зависимости от размеров профиля [28, 30].

Длина формующего участка для вспененных материалов принимается меньше, чем для невспененных, поскольку с увеличением длины канала расширяется зона падения давления, и вспенивание расплава может начаться уже в головке. Обычно длина формующего участка не превышает 10–15 мм. Чем меньше размеры профиля, тем короче должна быть формующая длина.

При конструировании фильеры следует предусмотреть возможность корректировки рабочих каналов при доводке. Как обычно, следует ориентироваться на возможное увеличение проходного сечения за счет удаления слоя металла, нежели на его уменьшение при использовании более трудоемких операций (напаивание, приварка). Более точная регулировка скоростей течения достигается за счет изменения длины формующего участка, высоты канала на входе или при использовании комбинации этих методов.

При экструзии разнотолщинных профилей в формующем канале рекомендуется устанавливать тонкие перегородки (толщиной 1–1,5 мм), отделяющие участки с различной толщиной. К выходу перегородки должны сходиться на нет и заканчиваться за 3–7 мм до выхода из фильеры.

При производстве толстостенных профилей на входе в формующий канал целесообразно дросселирование потока путем сужения проходного сечения до 10% от высоты формующего канала. Это позволяет поддерживать в формующей зоне необходимое давление и облегчает выравнивание скоростей течения расплава по краям канала. Длина участка с резко суженным сечением 1–2 мм, вход и выход из зоны дросселирования не должны иметь застойных зон.

Отверстие на выходе из фильеры рекомендуется скруглить, минимальный радиус округления составляет 0,3 мм.

Сборную фильеру, по мере возможности, не следует излишне часто разбирать и собирать.

Головки рассмотренного типа чаще используются в процессе *Goodrich*.

Головки для экструзии тонкостенных профилей. Тонкостенные профили (толщина стенок не более 1,5 мм), например, плоские пластины, экструдируют через прямоточные щелевые головки. Форма подводящих каналов должна обеспечивать равномер-

ный выход расплава по сечению и не иметь застойных зон. Соппротивление таких головок высокое и не вызывает опасения преждевременного вспенивания материала в головке. Подобные головки применяются для производства профилей с плотностью 0,5–0,7 г/см³.

Головки для экструзии профилей с компактным внешним слоем. Профили этого типа получают либо по методу *Celuka*, либо путем соэкструзии вспененного и монолитного жесткого ПВХ.

Экструзионная головка работает в комплекте с калибрующим устройством, которое устанавливается вплотную к головке. Головка предназначена для экструзии профилей с толщиной стенок более 5 мм и с плотным поверхностным слоем толщиной до 1 мм. При вспенивании происходит заполнение внутренней полости, поэтому необходимо правильно выбирать форму и размеры сечения фильеры.

Соэкструзией вспененного и жесткого ПВХ получают профили с относительно малой плотностью, но высокой жесткостью и прочностью, при этом получение гладкой наружной поверхности практически не вызывает затруднений. Степень изменения площади поперечного сечения (степень сжатия) при переходе в канал совместного течения двух материалов должна быть, по возможности, минимальной, длина формующего канала — 10–20 мм.

При конструировании соэкструзионных головок учитывают опыт эксплуатации головок для соэкструзии аналогичных монолитных материалов.

8.2.4. Калибрующие устройства

В зависимости от применяемого способа формования пенопрофиля калибрующее устройство устанавливается вплотную к экструзионной головке (процессы *Celuka*, *Gedal*) или находится на некотором расстоянии (25–100 мм) от нее (процессы *Goodrich*, *Armocel*).

Качество поверхности профиля в значительной мере зависит от расстояния между мундштуком и калибратором, а также от температуры стенок последнего. При малом расстоянии и холодном калибраторе получают гладкую поверхность и высокую плотность изделия. При малом расстоянии и горячем калибраторе достигается гладкая поверхность и низкая плотность в поверхностных слоях. Это следует принимать во внимание при отработке технологии экструзии пенопрофилей.

Калибрующее устройство лишь в минимальной степени должно ограничивать вспенивание экструдата (не более чем на 10%), поэтому, принимая во внимание данные табл. 8.3, высота щели фильеры должна быть меньше высоты канала калибра на 20–70%, а ширина щели — на 0–20%.

Усадка вспененных профилей незначительна, поэтому размеры отверстия калибра принимают равными номинальным размерам профиля.

Во избежание задиров и других поверхностных дефектов в калибраторе не должно быть острых кромок. На входе в калибратор целесообразно иметь входную зону длиной 10–15 мм с углами наклона образующих к оси экструзии 5–7°.

Длину длинномерного калибрующего устройства обычно принимают равной 400–600 мм. Если необходима повышенная точность изделия, то возможна установка двух или более последовательно расположенных сухих блоков калибраторов. До-

пускается также применение более коротких блоков, разделённых короткими открытыми коробами для подачи воды, используемой для охлаждения и смазки.

Рабочие поверхности калибратора должны быть гладкими, но не полированными. В качестве материалов для изготовления калибраторов используют бронзу, латунь с хромированием, сплавы алюминия с анодированной поверхностью, нержавеющую сталь. Нержавеющая сталь в настоящее время применяется чаще вследствие большей износостойкости и более простой обработки.

Конструкции длинномерных вакуумных калибраторов аналогичны применяемым при изготовлении монолитных профилей. Для снижения трения пеноматериала о стенки калибратора их покрывают фторопластовой эмульсией, либо вводят смазку (например, водяную) в процессе калибрования.

8.3. Комбинированные профили

К комбинированным профилям, в соответствии с классификацией, приведенной в главе 1, относятся многоцветные и многослойные изделия, получаемые методом совместной экструзии разных материалов (соэкструзия, коэкструзия), многослойные профили, получаемые методом дублирования основного профили каким-либо декоративным покрытием, и профили с сердечником, внутри которых присутствует декоративная или армирующая вставка. Возможны также комбинации из них, например, профиль из двух полимерных материалов может иметь дополнительно металлический декоративный или армирующий сердечник.

Технология производства этих двух групп изделий значительно отличается по используемому оборудованию, технологической оснастке, технологическим особенностям процессов. Это весьма обширная область, для детального освещения которой потребуется большой объем книги. Подробно эти вопросы рассмотрены в [30]. В настоящем разделе мы остановимся кратко на основных особенностях процессов.

8.3.1. Производство многоцветных изделий и профилей из различных полимеров

Многоцветные изделия или изделия из различных материалов получают с помощью процесса соэкструзии. Соэкструзия — это одновременная экструзия нескольких полимеров в целях придания изделию новых свойств, являющихся комбинацией свойств составляющих изделие материалов. Процесс соэкструзии широко применяется при изготовлении декоративных и отделочных деталей для автомобильной промышленности, приборостроения, медицинского оборудования, строительства. Методом соэкструзии можно получать изделия, которые за счет комбинации материалов с различными свойствами способны одновременно противостоять воздействию различных химически активных сред и атмосферных факторов, иметь различную жесткость компонентов и быть в то же время экономически выгодными. При этом такие комбинированные изделия нельзя получить другим способом или их производство сложно и трудоемко. На рис. 8.4 показаны некоторые типы соэкструдированных изделий из пластмасс.

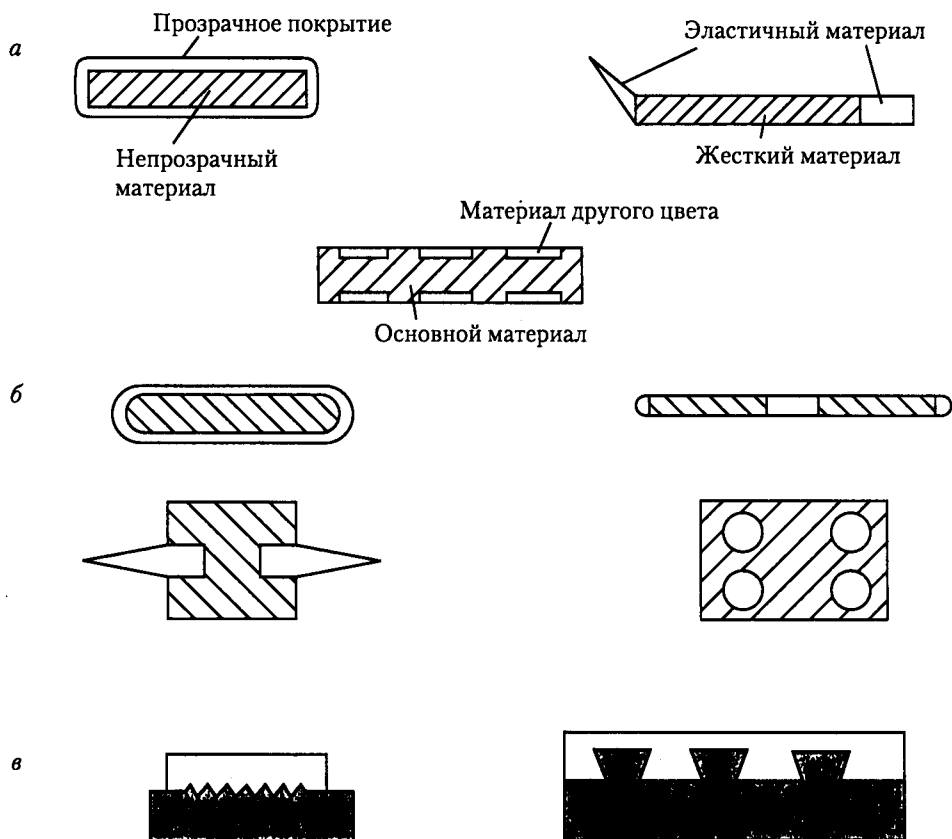


Рис. 8.4. Схемы комбинированных изделий, получаемых методом соэкструзии (а, б) и способы увеличения поверхности контакта (в)

Соединение слоев различных материалов (главным образом сваркой) может осуществляться в экструзионной головке или на выходе из нее. Способ соединения зависит от конструкции изделия и оснастки для его производства. В большинстве случаев сварка материалов производится в экструзионной головке, но возможны случаи их сварки и на выходе из головки (например, при изготовлении двухслойных гофрированных труб).

8.3.1.1. Требования к материалам и оборудованию

Для получения комбинированных изделий высокого качества материалы, используемые для соэкструзии, и технологическое оборудование должны удовлетворять определенным требованиям [32–34].

Требования к материалам. Основные требования, предъявляемые к материалам для производства многоцветных изделий и профилей из различных полимеров:

- способность к переработке в одном и том же диапазоне температур;
- хорошая адгезия или свариваемость материалов при переработке, отсутствие расслаивания;
- близкие реологические свойства расплавов;
- близкие теплофизические, механические, химические свойства (обеспечивают отсутствие коробления, появления пятен, расслоения изделия при эксплуатации и т. д.).

Температуры переработки совмещаемых материалов выбирают в зависимости от их вязкости. Поскольку расплавы материалов перед выходом из головки протекают через одни и те же каналы, то установленная температура на зоне головки должна обеспечивать течение более вязкого материала. В то же время температура не должна быть излишне высокой, чтобы не вызвать деструкцию низковязкого материала или снизить формоустойчивость экструдата на выходе из головки.

Однотипные материалы (жесткий и пластифицированный ПВХ, ПЭВП, ПЭНП и другие полиолефины) имеют хорошую совместимость друг с другом при соэкструзии. Прочность соединения материалов на границе раздела может быть улучшена за счет подбора состава материала, путем введения специальных добавок (праймеров), имеющих химическое сродство с обоими совмещаемыми материалами, а также за счет увеличения поверхности соприкосновения между слоями изделия (рифление, различного вида замки).

Близкие реологические свойства материалов важны с точки зрения контроля за формой изделия в целом и составляющих его элементов. Для материалов, имеющих различные кривые течения, изменение скорости экструзии вызывает неодинаковое изменение текучести компонентов. Это приводит не только к изменению толщины слоев материалов, но и к искажению формы экструдата за счет различной скорости потоков. Соэкструзия таких материалов возможна только в очень узком диапазоне технологических параметров, который в некоторых случаях можно расширить путем введения соответствующих видов процессинговых добавок.

Длительная эксплуатация комбинированного изделия предполагает нейтральность свойств составляющих компонентов по отношению друг к другу. Например, если один из компонентов изделия содержит добавку, способную мигрировать в другой материал, это может привести к снижению прочности самого изделия, ухудшению связи между слоями, к появлению на поверхности профиля пятен.

Требования к оборудованию. Процесс соэкструзии может быть реализован с использованием стандартных экструдеров или на специальных сконструированных для соэкструзии машинах. Последние не имеют широкого распространения, поэтому здесь не рассматриваются.

Установка для соэкструзии состоит из основного (главного) экструдера с головкой и примыкающего к нему дополнительного экструдера (соэкструдера). Соэкструдеров может быть несколько в зависимости от числа подаваемых в общую головку материалов, они могут располагаться вокруг общей головки под разными углами; чаще всего к основному экструдеру под прямым или другим углом примыкает соэкструдер.

Соэкструдеры изготавливают горизонтальными, вертикальными или универсальными, в которых цилиндр может изменять угол наклона по отношению к общей головке. Универсальная конструкция наиболее удобная и компактная.

При выборе типа соэкструдера следует обращать внимание на диаметр и геометрию используемого шнека. Диаметр шнека соэкструдера следует выбирать в зависимости от доли второго материала в общей массе профиля. Как правило, соэкструдер по производительности и размерам меньше главного, поскольку одинаковые или близкие доли различных материалов в общей массе профиля довольно редки. Чаще в качестве вспомогательного экструдера используют одношнековые машины с диаметром шнека 16–32 мм, для больших изделий — 45 мм [32].

Оборудование для соэкструзии должно иметь эффективную систему контроля и регулирования параметров процесса. Особое внимание следует уделять датчикам температуры и давления расплава, поскольку от их работы зависит управление течением каждого материала и процессом в целом. По возможности приборы контроля и регулирования следует размещать на общей панели, это облегчит работу по управлению линией. Использование промышленных компьютеров с выводом на дисплей текущих параметров процесса ускоряет и облегчает процесс наладки и сокращает непроизводительные затраты.

Бесперебойная работа оборудования и качество соэкструдированных изделий во многом зависят от способа и места присоединения соэкструдера к общей головке. Соединения должны быть прочными и жесткими, надежно обогреваться, к ним должен обеспечиваться свободный доступ для обслуживания крепежных деталей и датчиков. Сопрягаемые детали следует хорошо притереть.

В настоящее время имеется два основных способа соединения экструдеров: жесткое и гибкое. При жестком соединении соэкструдер должен точно позиционироваться относительно места присоединения к общей головке, что довольно трудоемко и не всегда дает хорошие результаты. В последнее время соэкструдеры стали подключать к общей головке с помощью гибких подводок. Такая подводка представляет собой толстостенный полимерный шланг из теплостойкого материала (например, фторопласта 4) в металлической оплетке, предохраняющей шланг от разрушения при повышенных давлениях в подводке. Снаружи шланг нагревается, температура нагрева регулируется обычными способами. Подводки рассчитаны на определенный диапазон температур и развиваемых в них давлений. Применение гибких подводок облегчает сборку и демонтаж соэкструзионной установки и расширяет возможности при конструировании оснастки.

Типовые конструкции головок. Головка является основным элементом в процессе соэкструзии. В ней осуществляется течение разнородных материалов по независимым каналам до момента слияния потоков, после чего оба материала текут совместно. Форма и размеры каналов должны обеспечивать возможность регулирования расхода независимых потоков, предотвращать искажение формы экструдата на выходе из головки и поддерживать необходимую пропорцию слоев материалов. Контроль параметров процесса осуществляется датчиками температуры и давления расплава, устанавливаемыми в независимых каналах. На рис. 8.5 показана схема головки для изготовления жесткого уголка с двумя уплотнительными накладками. Эффективным способом регулирования давления для вспомогательного потока является изменение размеров подводящих каналов (глубины h или длины подающего канала).

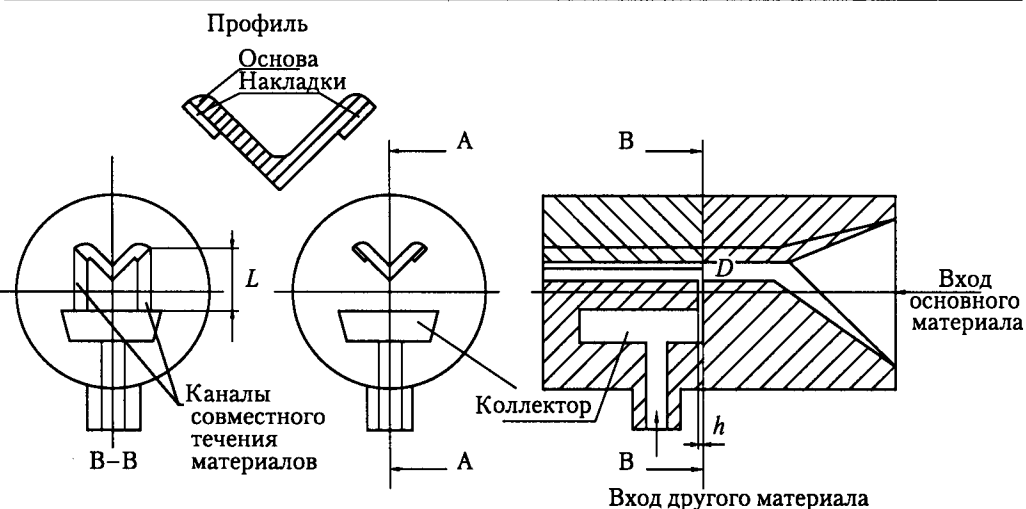


Рис. 8.5. Схема экструзионной головки для изготовления двухслойного комбинированного профиля [32]

Испытание и доводку соэкструзионных головок следует проводить на рабочих скоростях экструзии, так как испытание при других скоростях может не обеспечить нужных реологических характеристик расплавов и не позволит провести правильную корректировку конструкции головки.

Некоторые типы профилей могут состоять более чем из двух слоев материала. Если материалы слоев различны, то к общей головке присоединяется несколько экструдеров, каждый из которых подает свой материал. На рис. 8.6 показана схема экструзионной головки для изготовления трехслойного профиля. Корректировка течения потоков производится так же, как и в двухслойных головках. Головки для производства многослойных изделий сложны, дороги и требуют тщательного контроля параметров процесса.

Производство комбинированных изделий каждого типа, показанных на рис. 8.4, требует различного конструкционного решения головки. Места входа другого материала, области совместного течения потоков и выравнивания давлений в этих головках различны, и в каждом конкретном случае надо находить эффективное решение с учетом сказанного выше. Такая ситуация в еще большей степени делает область производства профильных изделий искусством, нежели наукой, а в искусстве, как известно, кроме ремесла нужен еще и талант.

Калибрование соэкструдированных профилей производится так же, как и обычных. Материалы в комбинированном профиле, которые не требуют калибрования (например, пластифицированный ПВХ), охлаждаются в калибраторе или на входе в него с помощью потока воздуха или капельного орошения водой. Размеры канала для прохода некалибруемого материала должны быть свободными для беспрепятственного движения; в месте соединения слоев ступеньки нежелательны, так как это может отражаться и на жесткой части профиля.

При комбинированном охлаждении мягкой части необходимо следить за охлаждением жесткого края в месте соединения слоев: переохлаждение может ухудшать свариваемость материалов, снижать глянец или приводить к искажению формы профиля.

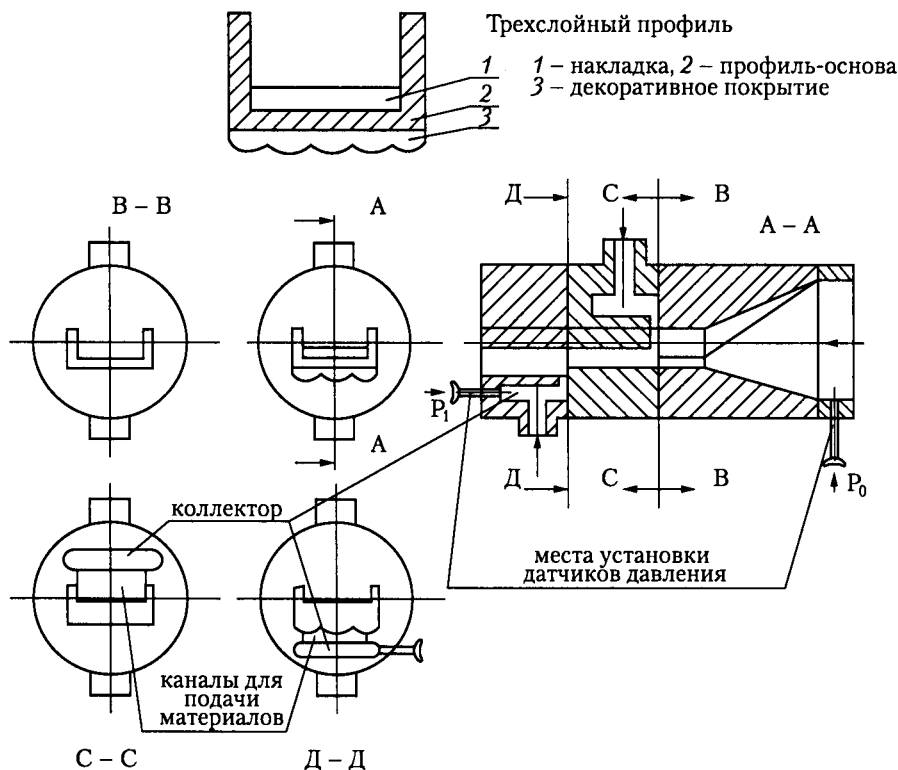


Рис. 8.6. Схема экструзионной головки для изготовления трехслойного профиля [32]

8.3.1.2. Особенности процесса соэкструзии

Несмотря на то что опыт при экструзии комбинированных изделий пока еще является главной предпосылкой для изготовления качественной продукции, знание основных закономерностей и особенностей совместного (стратифицированного) течения материалов [35, 36] позволит быстрее накапливать необходимый опыт и уменьшить вероятность появления ошибок при конструировании оснастки и при отладке технологического процесса.

Поверхности раздела при совместном течении расплавов. Хорошо свариваются только материалы одной химической природы или имеющее химическое сродство. Например, полиолефины могут легко свариваться с некоторыми полиамидами, но не свариваются со стирольными пластиками и поливинилхлоридами. Но даже для легко сваривающихся материалов прочность сварки зависит от поверхности контакта в месте соединения, температуры и давления расплава в зоне совместного течения. Увеличение каждого из этих параметров не всегда возможно, поэтому приходится находить оптимальное решение на основе имеющихся в наличии средств.

Соединение материалов вблизи выхода изучено еще сравнительно мало. Сварка материалов в этом случае происходит при сравнительно невысоком давлении и малом времени контактирования расплавов. Кроме того, подвод к основному материалу другого материала вблизи выхода вызывает возмущение основного потока, что может негативно отразиться на качестве продукта, в связи с чем важно правильно организовать подвод в зону контакта вспомогательного потока. В большинстве случаев это достигается конструктивными способами: подводом материала под небольшим углом к основному потоку, устранением завихрений и застойных зон или сужением потока.

Влияние вязкости полимеров. При совместном течении расплавов различных полимеров в экструзионной головке характер поверхности раздела зависит от их вязкости и эластичности. Более вязкий компонент проявляет тенденцию к образованию выпуклой поверхности раздела, тогда как менее вязкий компонент преимущественно смачивает стенки канала [36]. Регулирование характера поверхности раздела производится путем смешения полимеров с различной вязкостью или добавления смазок или низкомолекулярных веществ. Добавление к материалу менее вязкого компонента влечет за собой уменьшение перепада давления в канале. Добавление смазок или низкомолекулярных веществ позволяет существенно понизить давление экструзии полимеров с высокой вязкостью.

В соэкструдированных слоях менее вязкий компонент всегда стремится выгибаться в сторону более вязкого компонента, или, иначе, компонент с меньшей вязкостью стремится «инкапсулировать» компонент с большей вязкостью. В настоящее время природа нестабильности совместного течения объясняется разной энергией слоев независимо от расположения слоев с различной вязкостью.

Влияние высокоэластичности. При совместном течении двух жидкостей с различными вязкоупругими свойствами поверхность раздела деформируется. Различие в высокоэластичности двух компонентов может либо дестабилизировать, либо стабилизировать поток в зоне совместного течения в зависимости от соотношения толщин соэкструдированных компонентов, а также соотношения их вязкостей и упругостей.

В случае если две жидкости текут по прямоугольному каналу, соприкасаясь широкими сторонами, возможно появление волнистой поверхности раздела. Более вязкий компонент отжимает менее вязкий к периферии и обволакивает его [36]. Менее вязкий компонент проявляет тенденцию к смачиванию стенки фильеры, благодаря чему поверхность раздела приобретает выпуклость. Когда менее вязкий компонент окружает более вязкий, формирование криволинейной поверхности раздела в системе типа ядро-оболочка оказывается энергетически более выгодным, чем образование плоскости. В процессе течения поверхность раздела может смещаться от своего первоначального положения на стороне менее вязкого компонента к конечному положению на стороне более вязкого компонента. Доминирующую роль в формировании равновесной поверхности раздела между двумя жидкостями играют их вязкостные, а не эластические свойства.

Влияние времени совместного течения. При соэкструзии двух материалов перепад давления оказывается ниже, чем для каждого материала в отдельности. С увеличени-

ем времени совместного течения положение поверхности раздела между компонентами изменяется: более вязкий компонент смещается от периферии к центру.

При подаче более вязкого компонента внутрь менее вязкого форма поверхности раздела мало зависит от времени совместного течения, однако если более вязкий компонент располагается снаружи, поверхность раздела проявляет тенденцию приобретать несимметричную (эксцентричную) форму при увеличении времени течения.

Влияние скорости течения. При увеличении скорости течения менее вязкий компонент имеет тенденцию инкапсулировать более вязкий компонент (например, ПНП и ПС). При калибровании такого изделия увеличение скорости экструзии менее вязкого компонента может вызывать гофрирование наружной поверхности и нарушение процесса. Это вызывается тем, что текучесть низковязкого полимера возрастает быстрее, чем высоковязкого, но упругость последнего выше, она и препятствует увеличению толщины покрытия. Видимо, в этом случае толщину покрытия можно регулировать либо изменением температуры расплава низковязкого компонента, либо изменением высоты формирующего зазора, определяющего толщину покрытия.

Влияние температуры расплава. С увеличением температуры расплава более вязкий компонент внутри менее вязкого «расплывается», переходя от сферической формы к более плоской, со сглаженными углами.

Влияние вытяжки расплава. Экспериментально установлено, что при соэкструзии совместимых материалов (например, жесткого и пластифицированного ПВХ) могут возникать проблемы с обеспечением прочности стыка материалов при малой поверхности сцепления слоев. Например, при повышенной вытяжке экструдата возникающие на границе контакта нормальные напряжения стремятся разорвать слои. Это связано с тем, что каждый слой ведет себя как независимое изделие, которое при вытяжке уменьшает поперечные размеры, а сварка по боковым сторонам препятствует этому. Чем выше вытяжка и меньше прочность сварки, тем быстрее происходит разделение слоев. Повышение температуры расплава увеличивает прочность сварки, но возможность ее повышения зависит от свойств соэкструдированных материалов и факторов, отрицательно проявляющихся при повышении температуры. Самый надежный путь для обеспечения прочной сварки материалов по узким сторонам — это снижение продольной вытяжки экструдата. Для жесткого ПВХ продольная вытяжка расплава обычно рекомендуется на уровне 1,05–1,12, для более широких изделий принимают меньшие значения.

8.3.2. Дублированные и армированные профили

Некоторые виды профилей имеют декоративное покрытие из металлизированной фольги, синтетической пленки с определенным рисунком (под дерево, мрамор), синтетического ворса (профили с ворсистым слоем) и т. д. Эти профили называют дублированными, поскольку они получают методом поверхностной сварки основного профиля с дублирующим материалом. В некоторых случаях декорирование поверхности изделия производится механически с помощью закрепления жестких вставок в пазах на поверхности профиля. Рассмотрим некоторые виды декорированных профилей.

8.3.2.1. Металлизированные профили-молдинги

Широкое распространение в автомобильной, мебельной и некоторых других отраслях промышленности получили металлизированные профили-молдинги, состоящие из мягкого профиля на основе ПВХ-пластиката и приваренной к нему металлизированной ленты из синтетической пленки. Металлизированная лента представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из тонкой прозрачной ПЭТФ-пленки, алюминиевого слоя, мягкой подложки из каландрированной ПВХ-пленки, соединяемой с лавсановой пленкой с помощью специального клея. Приготовление дублирующей пленки производится отдельно и состоит из нескольких отдельных процессов: металлизации ПЭТФ-пленки в вакуумных металлизаторах, соединения ПВХ-пленки с металлизированной лавсановой пленкой с помощью клея, разрезание пленки на полосы нужной ширины на специальной резательной машине.

Дублирование профиля декоративной лентой происходит на выходе из экструзионной головки путем совместной прокатки профиля и подогреваемой перед сваркой подложки ленты в системе фигурных роликов. Плоские поверхности профиля и ленты свариваются без проблем, а на криволинейных поверхностях возможны отслоения, гофрирования и другие дефекты дублирования. Регулируемое прижатие пленки по элементам профиля для исключения проскальзывания по поверхностям, имеющим при калибровании разную линейную скорость, позволяет получить прочное и гладкое декорирующее покрытие.

Общим недостатком дублированных изделий такого типа является различная усадка профиля-основы и металлизированной пленки. ПВХ-пластикат подложки ленты не должен содержать мигрирующих пластификаторов, в противном случае пластификатор мигрирует в клеевое соединение и ослабляет адгезию между лавсановой пленкой и пленкой-подложкой. Ослабление адгезии, различная усадка лавсановой, поливинилхлоридной пленки и профиля-основы в многослойной конструкции, неодинаковое удельное давление прижатия пленки к профилю на плоской и криволинейной поверхностях может приводить к образованию гофров, отслоению пленки в отдельных местах и другим видам брака. Особенно заметно это проявляется при повышенных температурах эксплуатации.

В настоящее время такая технология производства профилей-молдингов морально устарела, хотя до настоящего времени на Узловском ПО «Пластик» производят двух- и трехслойные профили-молдинги для отделки салона автомобилей «Жигули». Кроме того, постепенно меняется внутреннее и внешнее оформление автомобилей и соответственно изменяется вид декорирующих профилей и технология их изготовления.

Другим видом декоративных профилей являются самоклеющиеся молдинги с толстой алюминиевой фольгой. Это тоже многослойная конструкция, состоящая из профиля-основы, толстой (200 мкм) алюминиевой фольги со специальным лаковым покрытием и клеящей ленты с защитным слоем вошеной бумаги. Лакированная фольга и клеящая лента — это полуфабрикаты, которые приобретаются для дублирования профиля на других предприятиях или по импорту.

Схема изготовления самоклеющегося профиля-молдинга показана на рис. 8.7.

Алюминиевая фольга такой толщины имеет повышенную продольную устойчивость, что предохраняет профиль от усадки при нагреве, и она предохраняет клеевой слой клеящей ленты от проникновения пластификатора и ослабления ее клеящей способности.

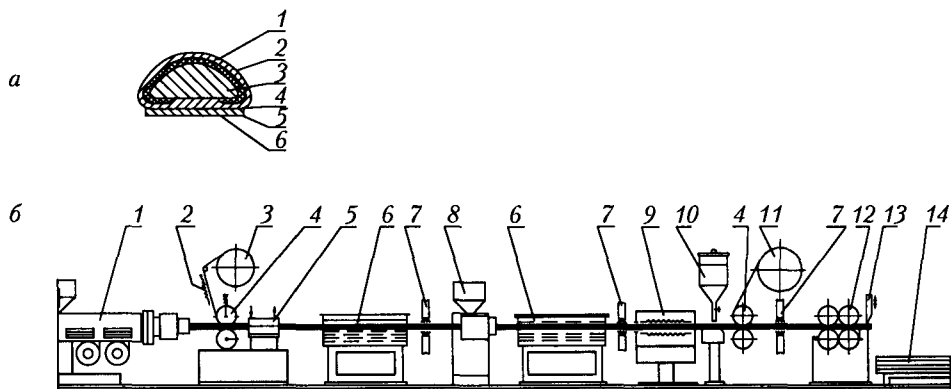


Рис. 8.7. Схема линии для производства самоклеющегося профиля-молдинга [30]:

- a* — схема профиля-молдинга с клеящей лентой: 1 — защитное прозрачное покрытие; 2 — металлизированная лавсановая лента; 3 — профиль-основа; 4 — клеевой слой; 5 — липкая лента; 6 — защитная пленка для клеевого слоя;
- б* — технологическая схема: 1 — экструдер; 2 — нагреватель подложки ленты; 3 — катушка с металлизированной лентой; 4 — калибрующие ролики; 5 — калибрующее устройство; 6 — охлаждающее устройство; 7 — «воздушный нож»; 8 — экструдер с угловой головкой; 9 — термостат; 10 — подача праймера; 11 — подача и приклейка липкой ленты; 12 — тянущее устройство; 13 — устройство для резки; 14 — приемное устройство

Лакированная фольга имеет специальное лаковое покрытие, состав которого позволяет при подогреве (активации) прочно приваривать фольгу к основанию профиля.

Прикатка клеящей ленты к алюминиевой фольге производится системой роликов с регулируемым прижатием, защитная бумага или пленка со стороны клеевого слоя перед дублированием удаляется и сматывается на катушки.

Лакированная алюминиевая фольга, необходимая для данного процесса, и самоклеющаяся лента в России не производятся и закупаются по импорту, например, в Италии.

На Узловском ПО «Пластик» разработано собственное производство самоклеющихся молдингов для корпуса легковых автомобилей с использованием отечественной фольги, которая по свойствам не уступает импортной. Для улучшения сварки профиля-основы с фольгой изменена схема сварки: фольга, лакирование импортным лаком и сушка которой производятся на заводе, подается в угловую головку экструдера, где с лакированной стороны сваривается с основным материалом профиля. Сложность процесса состоит в недопущении затекания расплава ПВХ-пластиката на сторону, к которой далее приклеивается липкая лента. Данная задача успешно решена при помощи головки особой конструкции.

Другой технологической проблемой при такой схеме процесса является появление повышенной криволинейности массивного профиля при охлаждении. Действительно, наружные, средние и примыкающие к фольге слои охлаждаются с различной скоростью, в результате чего возникают термические напряжения, приводящие к искривлению профиля. От этого не спасает даже толстая фольга, что указывает, какого уровня напряжения возникают при неравномерном охлаждении. Данная задача была решена с помощью регулируемого охлаждения.

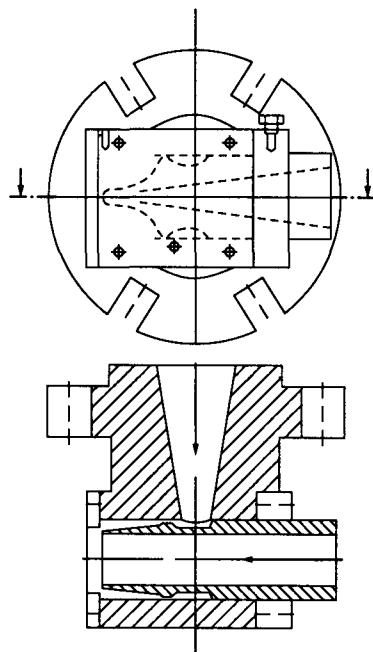


Рис. 8.8. Угловая головка для изготовления прозрачных профилей с фольгой [37]

8.3.2.2. Двухслойные профили-молдинги с алюминиевой фольгой

К профильным изделиям с сердечником относят сплошные и полые профили, внутри которых имеется декоративная или армирующая вставка (сердечник: труба, стержень, металлическая лента или фольга, другой полимерный профиль), покрытый со всех сторон основным полимерным материалом. Такого рода изделия принципиально аналогичны кабельной продукции, их получают на экструзионных агрегатах с угловой головкой по схеме, показанной на рис. 8.8.

Аналогичным способом получают армирующие шланги; в этом случае в угловую головку подается шланг из полимерного материала с навитой под углом к движению синтетической армирующей нитью. Нить навивается в виде сетки с помощью двух план-шайб, вращающихся в противоположных направлениях; частота навивки и угол каждой спирали регулируется изменением скорости вращения план-шайб и скорости движения армированной трубы, которую называют внутренней камерой.

Общим требованием при производстве изделий с сердечником является необходимость подготовки его поверхности для улучшения адгезии к полимерному материалу. Она включает правку геометрической формы (для металлических сердечников), например, с помощью пластической деформации, обезжиривание, нагрев сердечника и его ориентирование относительно отверстия угловой экструзионной головки. В некоторых случаях производят предварительное пластическое формование металлических сердечников в виде профиля определенной геометрии (например, в виде уголка или U-образного профиля из плоской металлической ленты), но проще производить пластическое изменение формы сердечника, уже покрытого полимером. По такой

схеме получают большинство декоративных профилей с фольгой. Для их производства используются прозрачные или непрозрачные полимерные материалы, а фольга придает жесткому профилю пластичность для дальнейшей обработки уже без нагрева.

Примером производства профилей с фольгой является технологический процесс производства сточного желоба крыши легковых автомобилей. Процесс состоит в подготовке алюминиевой лакированной фольги толщиной порядка 70 мкм (разрезание на ленты нужной ширины и активирование лакового слоя открытым пламенем газовой горелки), покрытия активированной ленты в угловой головке слоем пластмассы и пластическим формованием профиля нужной геометрии в длинномерном охлаждаемом водой калибраторе. Для сточного желоба после калибратора внутрь полости профиля дополнительно вводят уплотнительную синтетическую мастику в целях дополнительного крепления изделия на железном ребре крыши автомобиля и предохранения его от коррозии.

В качестве материала для изготовления профиля используют прозрачные, тепло- и атмосферостойкие марки ацетобутиратцеллюлозного этрола (АЦБЭ, САВ) или непрозрачные полимерные смеси поликарбоната и АБС-пластика (например, типа *Byblend* фирмы *Bayer*, ФРГ). Материалы перед переработкой обязательно подсушивают; это особенно важно для прозрачного АЦБЭ, поскольку данный материал довольно пластичен, а армирование фольгой многократно увеличивает его пластичность, что позволяет производить деформацию материала в холодном состоянии без разрушения — процесс практически невыполнимый без армирования. Необходимость такой операции вызывается специальной формой концов отрезков сточного желоба для закрепления на криволинейной поверхности кузова автомобиля. Выполняют эту операцию уже после изготовления профиля на специальной машине путем пластической деформации концов и обрезки их под заданными углами при нормальной температуре.

Другие подобные изделия могут иметь схему процесса, несколько отличающуюся от описанной выше. Например, толщина армирующей фольги может находиться в пределах 20–80 мкм; вместо открытого пламени газовой горелки для активации лакового слоя может использоваться инфракрасный нагрев; для улучшения адгезии полимера к фольге в материал добавляют специальные адгезионные добавки, например, типа сополимера винилацетата с винилхлоридом (расход добавки порядка 2–7 г на 1 м² алюминиевой фольги).

Покрытие фольги полимером осуществляется вблизи выхода из угловой головки, показанной на рис. 8.8. Формующее отверстие в головке выполняется очень тщательно с чистотой поверхности 0,32–0,63 мкм, что позволяет предотвратить образование на фольге продольных полос. Направляющую вставку головки (пиноль) изготавливают из меди или другого мягкого цветного металла, рабочие поверхности полируют. Пиноль профилируют таким образом, чтобы расплав поступал на поверхность фольги под небольшим углом. Между концом головки пиноли и входом в фильеру предусматривается возможность регулирования расстояния, поэтому на головке с одним типом пиноли возможно получать различные профили. Для этого меняется лишь конструкция формующей фильеры. Оптимальное качество поверхности обеспечивается при расстоянии между концом пиноли и входом в фильеру равном 0,5–2 мм [37]. Толщина фильеры составляет 3–10 мм, чаще 5–6 мм. Коническое сужение в фильере в направлении течения расплава обычно не требуется, только на входе на длине 2–3 мм

предусматривают скругление кромок. Хорошая прозрачность оболочки двухслойного профиля достигается при нанесении покрытия на ленту почти без давления и без сдвига слоев расплава относительно фольги.

Размеры формующего отверстия фильеры устанавливают, ориентируясь на пробные испытания и опыт производства аналогичных изделий. Первоначально проектируют фильеру с минимальными размерами фасонного отверстия, в процессе доводки головки размеры увеличивают до оптимальных.

При конструировании головки следует избегать острых кромок и зон застоя расплава, например, в местах установки датчиков измерительных приборов. Не допускается нарушение ламинарного режима течения расплава, поэтому все рабочие поверхности головки, соприкасающиеся с расплавом, должны иметь плавные очертания.

Ацетобутиратцеллюлоза относится к термостабильным материалам, поэтому перед входом в фильеру допускается скапливание расплава. Работа с аккумулярованием при изготовлении декоративных профилей предпочтительна, так как при этом в значительной степени сглаживаются кратковременные колебания производительности экструдера. Кроме того, в широком сечении расплав течет медленнее и спокойнее, чем в узком канале, а это облегчает поддержание устойчивого ламинарного режима.

Обогрев головки, как и при производстве других типов профилей, осуществляется бандажными электрическими нагревателями сопротивления, удельная мощность обогрева — не менее 3 Вт/см^2 .

Поскольку формование профилей с фольгой производится в калибраторе, то его форма по длине должна постепенно трансформироваться от плоской на входе до соответствующей фигурной на выходе. Высота щелевого отверстия на входе должна быть несколько выше толщины ленты с покрытием. В некоторых случаях вход в калибратор целесообразно сделать слегка изогнутым по форме профиля.

Калибратор выполняется разъемным и устанавливается непосредственно в ванну с водой или на подставке перед охлаждающей ванной с подачей воды непосредственно на профиль из шланга или форсунки. Такая схема охлаждения возможна только для пластичных и медленно остывающих расплавов полимеров, иначе неизбежно коробление профиля.

Длина перехода составляет около $1/3$ от общей длины калибратора, которая выбирается в зависимости от толщины профиля и скорости его отвода и обычно составляет 150–250 мм. На остальной длине происходит охлаждение и стабилизация готового изделия. Начальный участок калибратора следует термостатировать. Профиль должен выходить из калибрующего устройства достаточно охлажденным, особенно при необходимости выдержать его размеры с высокой точностью.

Рабочие детали калибрующих устройств изготавливают из латуни, бериллиевой бронзы и других теплопроводных материалов, которые имеют также хорошее скольжение. Для улучшения качества профиля и уменьшения трения при калибровании в охлаждающую воду вводят эмульгаторы типа ОП7.

При экструзии оптически прозрачных изделий весьма важна стабильность подачи расплава шнеком экструдера и равномерность отвода (без вибрации) профиля тянущим устройством.

В качестве тянущего устройства используют ленточные или траковые транспортеры с мягкими лентами или резиновыми башмаками.

Резка профиля в процессе изготовления производится гильотинными или дисковыми ножами. Угол заточки режущего инструмента составляет около 10° . Скорость резки должна быть достаточно большой, чтобы предотвратить опасность жесткого удара во время резки и исключить необходимость продольного перемещения режущего устройства вместе с движущимся профилем.

8.3.2.3. Профили с ворсистой поверхностью

Некоторые виды комбинированных профилей имеют поверхность в виде бархата или ворсистой щетки из синтетических щетин. Такие профили могут использоваться, например, в виде уплотнения и чистки опускного стекла двери автомобиля. Нанесение ворса на поверхность подложки производится в сильном электростатическом поле на специальных машинах, ориентирующих заряженные ворсовые частицы нормально к поверхности подложки, на которую предварительно наносят клей для приклеивания ворса.

В настоящее время для таких ворсистых комбинированных профилей используют узкие полиамидные ленты с длинным (3–4 мм) ворсом в виде щетки. Такие жесткие ленты вставляют в паз специального уплотнительного профиля из поликарбоната или прозрачного ПВХ в едином процессе или раздельно. Ворсистая лента в России не производится и закупается по импорту, а изготовление профиля с пазом из поликарбоната производится по обычной технологии, которая рассмотрена в главе 7. К особенностям такого процесса следует отнести обеспечение точных размеров паза для свободной, но плотной установки ворсистой полиамидной ленты.

8.3.2.4. Металлопластмассовые профили

Армирование металлом придает профилю необходимую жесткость, прочность и стабильность размеров. В то же время пластмасса защищает металл от атмосферных воздействий, придает комбинированному профилю привлекательный внешний вид, улучшает теплоизоляционные характеристики изделия. Такие профили находят широкое применение в строительстве, автомобильной, автотракторной и других отраслях промышленности. В качестве армирующего сердечника могут использоваться ленты, сетки и профили из черного металла. Армирующие сердечники перед поступлением в экструзионную головку требуют подготовки: обезжиривания, правки, подогрева, иногда сварки торцов отрезков короткой длины для обеспечения непрерывности покрытия. Общие требования к оборудованию, оснастке и материалам рассмотрены в главе 2.

На рис. 8.9 показаны некоторые типы металлопластмассовых профилей немецкой фирмы *Draftex*, применяемые в качестве уплотнителей в грузовых и легковых автомобилях, автобусах, тракторах [38, 39]. Большинство из этих профилей армируются упругой перфорированной стальной лентой. Перфорирование ленты производится таким образом, чтобы уменьшить поперечную упругость для изгиба ленты (в виде змейки); отверстия в ней способствуют проникновению расплава на другую сторону, создавая анкерующие «заклепки» и замоноличивание ленты в толще покрывающего ленту полимера.

Формование профиля нужной формы для крепления на транспортных средствах производится на специальных гибочных станках отдельно и с большой скоростью протяжки плакированной ленты. Конечный профиль должен обладать упругостью, чтобы обеспечить надежное обжатие ребра или листа корпуса автомобиля в месте

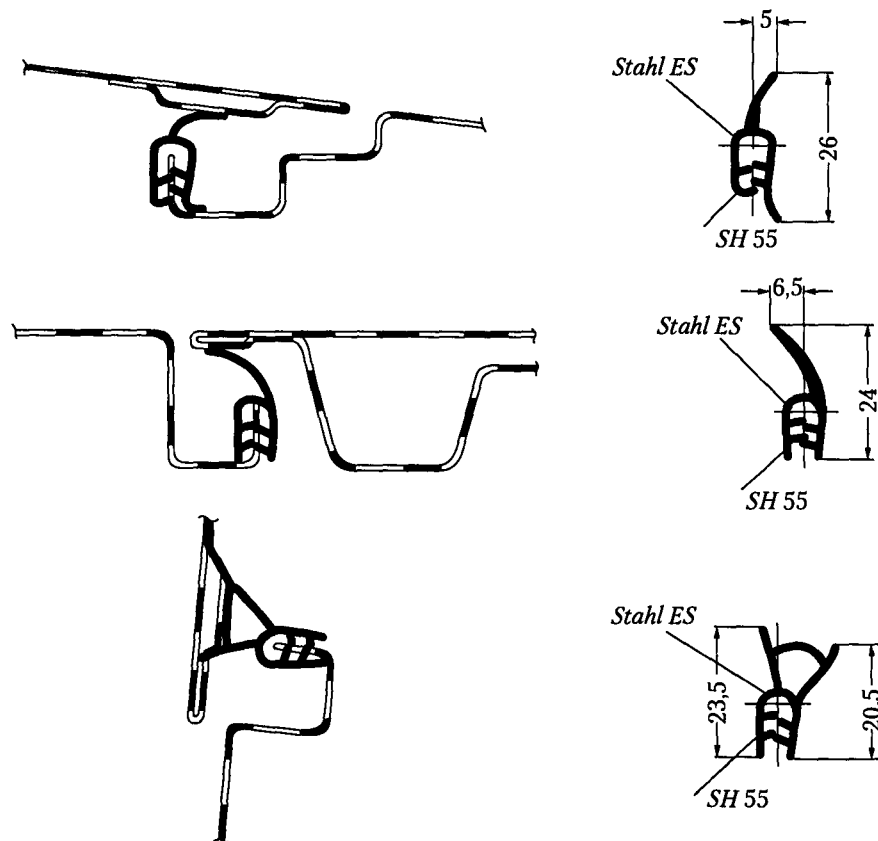


Рис. 8.9. Некоторые виды металлопластмассовых профилей и способы их монтажа на корпусе автомобиля [38]

крепления, поэтому к стальной ленте предъявляются специальные требования по упругим деформациям.

При изготовлении комбинированного профиля, например, металлопластмассо-резинового, крепление отдельно изготовленного резинового профиля осуществляется на гибочном устройстве с помощью специального клея. Перед приклейкой поверхности обоих профилей для улучшения сцепления между ними активизируют нагревом.

8.4. Экструзия рельефных профилей

Некоторые типы профильных изделий имеют продольные или поперечные ребра, выступы, пазы, выемки, рифы, нарезку, желобки, рисунок в виде шинного протектора и т. д. Экструзия профилей с непрерывными продольными выступами или впадинами не представляет затруднений. Образование таких рифов или впадин осуществляется либо за счет деформации пластичного экструдата в калибрующем устройстве

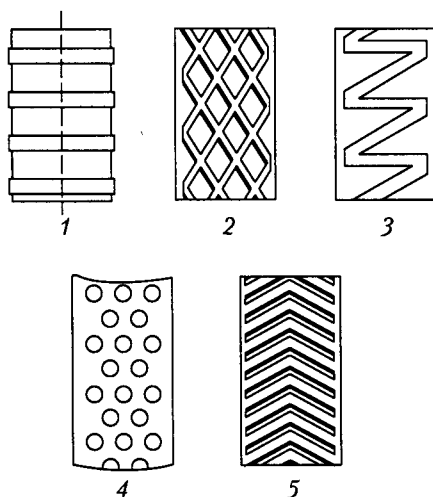


Рис. 8.10. Некоторые виды рисунков на ободке накатывающей втулки при производстве рельефных профилей [40]:

1 — поперечные выступы; 2 — протектор; 3 — зигзаг; 4 — цилиндрические выступы; 5 — шеврон

(при небольших размерах рифов), либо при калибровании заготовки, форма которой близка к конечному профилю.

Гораздо сложнее получать изделия с поперечным рельефом типа ромба, зигзага, или с периодическими или сплошными поперечными впадинами или рифами. Обычно такие детали производят методом литья под давлением либо экструзией с применением калибрующих устройств с движущимися (вращающимися) деталями. Например, можно использовать специальный гофриатор, аналогичный используемому при производстве гофрированных труб. Но такие способы сложны, относительно трудоемки и дороги и для производства небольших партий изделий практически не применяются.

Давно известна (в настоящее время редко применяется) простая и недорогая, имеющая широкие возможности технология производства рельефных профилей с поперечным рисунком, в соответствии с которой можно получать разнообразные профили типа амортизаторных прокладок, протекторных шин для газонных тележек, рельефных декоративных накладок для автомобильной и других отраслей промышленности [40]. На рис. 8.10 показаны некоторые виды рисунков, которые можно наносить на поверхность экструдированных профилей по новой технологии. Рисунки можно комбинировать в любой последовательности как по ширине, так и по длине профиля.

Технологическая схема производства рельефных профилей показана на рис. 8.11.

При установке накатывающей втулки 5 на выходе из головки можно получать рельефные рисунки любой формы глубиной до 2,5 мм. По данному методу можно получать профили из пластифицированного ПВХ и других эластичных и полужестких термопластов (ПЭНП, эфироцеллюлозных пластиков и др.). Для получения рельефных профилей из жестких термопластов требуется установка второй накатывающей втулки, выступы и впадины которой вместе с первой втулкой образуют как бы движущиеся пуансоны и матрицы, формирующие ячейки рисунка.

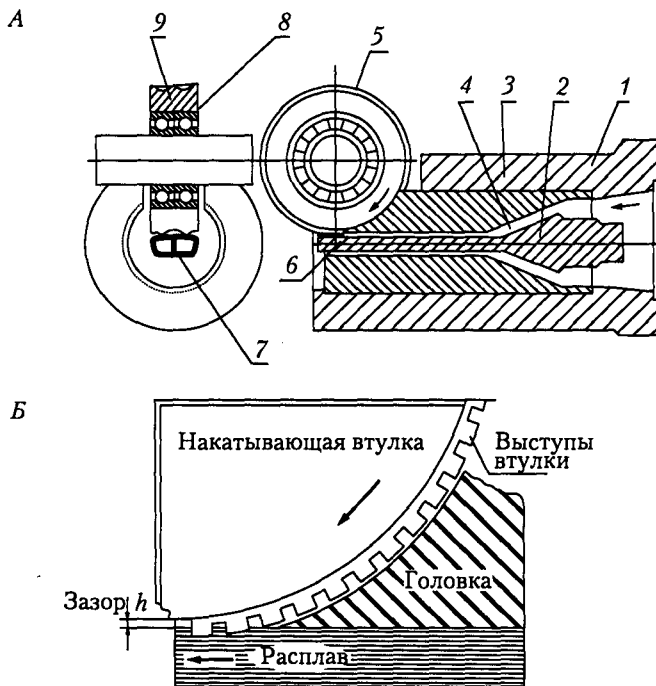


Рис. 8.11. Технологическая схема изготовления рельефных профилей: А — общая схема работы; Б — схема работы накатывающей втулки

А: 1 — корпус головки; 2 — дорн; 3 — фильера; 4 — расплав; 5 — накатывающая втулка; 6 — зазор между втулкой и фильерой; 7 — экструдат; 8 — подшипник; 9 — выступы накатывающей втулки

Основной особенностью производства рельефных профилей является необходимость поддержки профиля снизу при накатке рисунка. Для этого формующую часть фильеры делают вдвое длиннее, чем для головок, на которых экструдировать профили без рисунка, при этом допуски на точность выполнения размеров фильеры ужесточаются до 0,05–0,1 мм.

При экструзии рельефных профилей необходимо принимать во внимание следующее:

- формующая зона фильеры должна быть достаточно длинной, чтобы обеспечить ламинарное стационарное течение расплава перед нанесением рисунка на экструдат;
- следует экструдировать профили с одинаковой толщиной стенок: это обеспечит равномерное течение расплава и снизит опасность искажения элементов рисунка при накатке на экструдат;
- при изготовлении полых профилей дорн должен быть несколько длиннее фильеры с тем, чтобы выступающая часть дорна служила опорой экструдата при накатке рисунка;

- ось накатывающей втулки должна несколько отстоять от плоскости фронта фильеры, чтобы при выходе экструдата из головки на него действовало бы некоторое давление со стороны втулки;
- во избежание образования на профиле поверхностных дефектов рабочие поверхности накатывающей втулки и фильеры следует выполнять тщательно, без царапин, рисок, задиrow, сколов;
- для компенсации перемещения материала, вызванного движением выступов втулки, между рабочей поверхностью фильеры и дном полостей втулки должен быть некоторый зазор (см. рис. 8.11);
- величина зазора между втулкой и фильерой должна быть достаточной, чтобы обеспечить свободное вращение втулки, но не слишком большой, чтобы предотвратить утечку расплава полимера;
- диаметр накатывающей втулки должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить необходимое время воздействия втулки на расплав, поскольку втулка работает аналогично валкам каландра и при воздействии выступов втулки расплав заполняет ее полости;
- выступы и впадины накатывающей втулки не должны иметь острых кромок и резких углов; все переходы необходимо скруглить;
- при выходе экструдата из головки следует как можно скорее охлаждать нижнюю его часть;
- втулка не требует специального привода, она вращается от действия выходящего из головки расплава, но подшипники следует хорошо смазать и не допускать загрязнения сепараторов;
- следует поддерживать температуру фильеры, равной температуре расплава; накатывающую втулку следует охлаждать; для охлаждения достаточно регулируемого потока сжатого воздуха.

Работа с описанной головкой не представляет затруднений и не требует специального обучения обслуживающего персонала.

8.4.1. Оконные профили, дверные панели, подоконники

8.4.1.1. Введение

Окна и двери являются строительными элементами любого дома. И от того, как выглядит окно и двери снаружи и изнутри, какие функции они выполняют и как с этим справляются зависит настроение и работоспособность обитателей дома, квартиры, офиса, административного помещения, лаборатории, цеха.

Как известно, в настоящее время для изготовления оконных и дверных блоков применяются дерево, алюминий и пластмассы. Дерево — наиболее экологически чистый и привычный материал, но он требует большего ухода, чем алюминий или пластмассы. Алюминиевые окна очень прочны, однако обладают высокой теплопроводностью и сравнительно дороги. Пластмассовые окна в значительной мере универсальны: они экологичны, требуют минимум ухода, обладают достаточно высокой прочностью и хорошими теплоизоляционными свойствами, стойки к коррозии и атмосферным воз-



действиям. Они значительно дешевле алюминиевых и даже деревянных, если иметь в виду современные окна из наборной древесины разных пород.

За рубежом пластмассовые окна известны уже около 50 лет. Впервые они были изготовлены в Германии в 1954 г. на заводах компании *Dynamit Nobel* (в настоящее время *HT Troplast AG*) под торговой маркой *Trocal*. Затем полимерные материалы стали применяться при изготовлении окон более широко, потому что их главное преимущество по сравнению с окнами из других материалов — технологичность. Ныне каждое второе окно в мире пластмассовое, изготовленное из композиций ударопрочного поливинилхлорида. НПВХ достаточно тепло- и морозостоек, не поглощает влагу, стоек ко многим агрессивным средам, относится к материалам, не поддерживающим горение. Свойства материала более подробно освещены в главе 7.

По пластмассовым окнам публикуется обширная информация, особенно зарубежная; в России выпускается ежемесячный информационный бюллетень «Окна и Двери», проводятся ежегодные выставки по этой тематике, семинары зарубежных фирм для производителей окон и комплектующих изделий.

Пластмассовое окно — это готовая конструкция, состоящая из множества комплектующих деталей. Основу конструкции составляют пластмассовые профили, но в ней присутствуют также металлические армирующие детали, фурнитура, стекла, разного рода уплотнители. В совокупности они составляют оконную систему. Оконных систем много, их разрабатывали и продолжают разрабатывать различные производители и потребители на протяжении всего периода развития этого вида строительной продукции.

Ниже кратко остановимся на основных отличиях оконных систем разных поставщиков и более подробно — на производстве комплектующих пластмассовых погонажных изделий для них.

8.4.1.2. Оконные системы

Основу оконной системы составляют многокамерные пластмассовые профили. Многокамерные ПВХ-профили кроме воздушных полостей имеют дополнительные ребра жесткости и обычно армируются фасонными профилями из оцинкованной стали. Для герметичного прилегания створок к раме используются уплотнители из резины, ТЭП или полиуретана. Благодаря воздушным полостям рамы из ПВХ обладают небольшим весом, в них предусматривается отвод дождевой воды через специальные каналы или вентиляционные предкамеры, необходимые также для выравнивания разности давления водяных паров. В среднем на одну оконную раму расходуется около 12 м профилей.

На сегодняшний день уже разработаны десятки систем многокамерных профилей для рам. Из них наиболее распространены трехкамерные с толщиной наружной стенки около 2,5–3 мм. Основная функция окна — теплоизолирующая. Материал оконной рамы, ударопрочный НПВХ, имеет низкую теплопроводность; благодаря особой конструкции профилей, составляющих раму, и способа соединения их со стеклами в стеклопакет теплоизоляционные свойства конструкции еще более возрастают. Коэффициент теплопроводности для окон из ПВХ колеблется в настоящее время от 1,3 до 2,6 Вт/м · К в зависимости от конструкции.

Из ПВХ-профилей можно изготовить раму любой формы: прямоугольной, квадратной, треугольной, в виде арки или даже круга благодаря пластическим свойствам

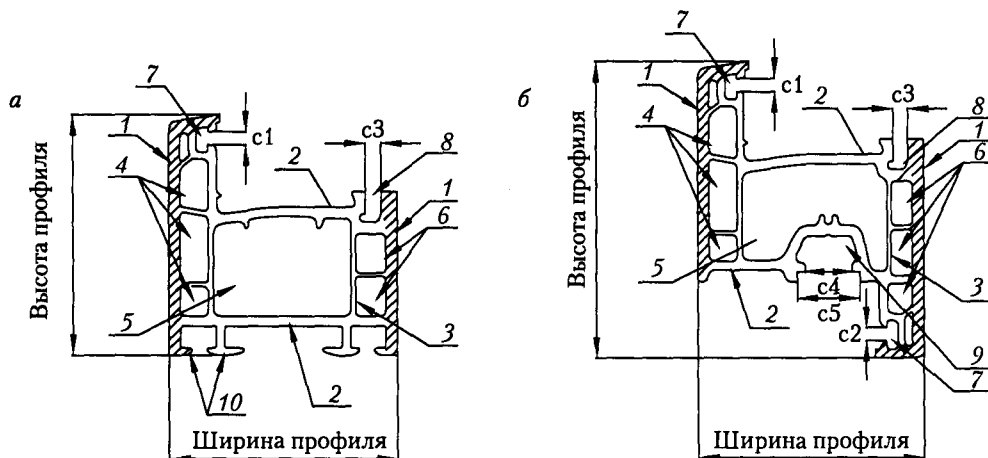


Рис. 8.12. Конструктивные элементы оконных профилей [41]:

а) поперечное сечение профиля коробки; б) поперечное сечение створки:

1 — лицевая внешняя стенка; 2 — нелицевая внешняя стенка; 3 — внутренняя стенка; 4 — первая камера; 5 — вторая (основная) камера; 6 — третья камера; 7 — паз для установки уплотнительной прокладки; 8 — паз для установки штапика; 9 — паз под запирающий прибор; 10 — монтажные зацепы; c1–c5 — функциональные размеры пазов

материала при нагреве. Наиболее распространен белый цвет окон, но могут использоваться и другие цвета. Все оконные профили можно покрывать специальной пленкой под ценные породы дерева, в том числе и с двух сторон (например, внутренняя сторона — белая, а внешняя — с фактурой дуба). Возможно также изготовление комбинированных профилей методом соэкструзии с покрытием внешней лицевой стороны атмосферостойким материалом.

Качество и долговечность окна зависят, в основном, от конструкции составляющих элементов. Многие эксперты полагают, что немецкие профили более других подходят для российского климата. Профиль из Канады и США обычно не имеет металлического усиления и состоит из одной камеры: для русских морозов этого недостаточно, английские же окна поступают, как правило, уже в собранном виде, поэтому очень дороги. Лицензионные профили (турецкие, польские, белорусские) дешевы, но их качество ниже, чем у ведущих западных фирм. Большое количество фирм занимается производством оконных профилей в Германии. Все они входят в Объединение производителей высококачественных оконных профилей, их продукция маркируется своеобразным «знаком качества», по которому легко отличить фирменный профиль от подделки. Сегодня все больше российских фирм производит оконные рамы из ПВХ на основе профилей и комплектующих, поставляемых западными партнерами.

Отечественные производители оконных профилей, осваивающие эту технологию с помощью ведущих западных фирм, производят продукцию, по ряду характеристик не уступающую по качеству зарубежным образцам. Типы и качество отечественных оконных профилей регламентируется ГОСТом 30673-99 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков» [41]. На рис. 8.12 приведены



конструкционные элементы основных оконных профилей, выпускаемых отечественной промышленностью.

На рис. 8.13 показаны возможные конструкции основных оконных профилей, используемые в разных оконных системах, а на рис. 8.14 — типы дополнительных («доборных») профилей. Некоторые оконные системы подробно рассматриваются в [42–47].

Качественные окна сборщики предпочитают изготавливать из импортных комплектующих профилей. В нашей стране широко представлены такие известные фирмы и торговые марки, как *REHAU*, *KBE*, *VEKA*, *ALUPLAST*, *GEALAN*, *TROCAL* и др. Обзор оконных систем некоторых производителей приводится в Приложении 10.

Основными тенденциями в развитии профильных систем [48, 49] являются: увеличение числа камер до четырех–шести с соответствующим увеличением толщины профилей до 70 мм и более, чем достигается повышение теплофизических характеристик (сопротивление теплопередаче профиля с металлическим армированием возрастает до $0,75\text{--}0,85 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$); применение широкой так называемой «русской» коробки, устраняющей возможность промерзания окон по откосам; переход к использованию трех контуров уплотнителей (для повышения звуко- и теплоизоляции); развитие комбинированных систем ПВХ–алюминий, алюминий–ПВХ–дерево и др.

8.4.1.3. Производство

Как следует из анализа оконных систем, оконные профили представляют собой весьма сложный и ответственный продукт, требующий для изготовления мобилизации всех интеллектуальных и технических средств. Изготовление оконных профилей можно по праву считать вершиной технологии переработки профильных изделий.

Далее рассмотрим техническую сторону производства оконных профилей: используемое оборудование, оснастку, материалы, особенности технологии, методы контроля и испытания. Вопросы, касающиеся сборки пластмассовых окон, здесь не рассматриваются, поскольку они выходят за рамки обсуждаемой тематики. Кроме того, это сугубо специальный вопрос, во многом связанный со строительной тематикой.

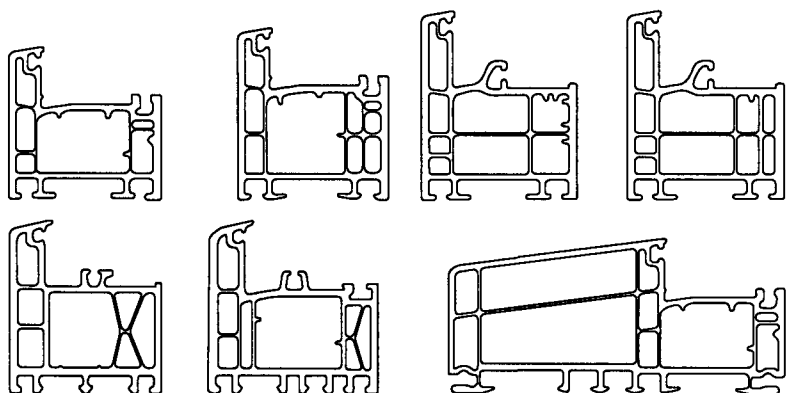
Оборудование. Современное оборудование для шнековой экструзии позволяет перерабатывать порошкообразные и гранулированные термопласты и получать с высокой производительностью и хорошим качеством профили самой разнообразной формы.

Для переработки порошкообразного суспензионного ПВХ применяются в основном двухшнековые экструдеры с коническими или цилиндрическими шнеками, вращающимися в противоположных направлениях.

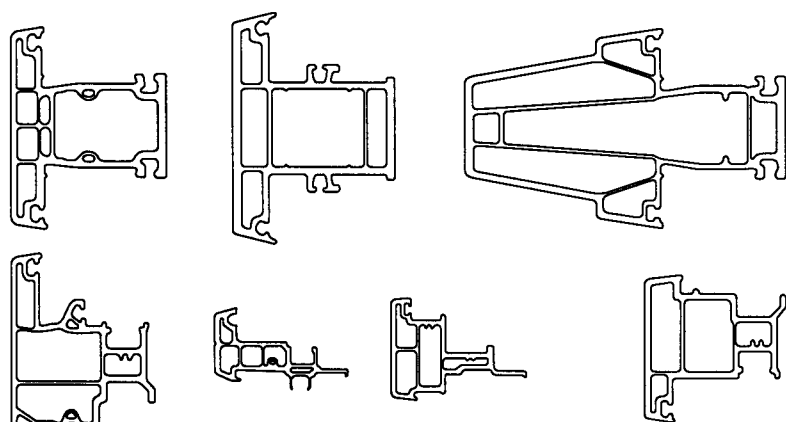
Производственная линия для изготовления ПВХ-профилей включает экструдер, экструзионную головку с фильерой, систему сухого и мокрого (влажного) калибрования, тянущее устройство, пилу для резки профиля, устройства для укладки и упаковки готовой продукции. Линии могут доукомплектовываться соэкструдерами и дополнительными устройствами, например, для нанесения на профиль защитной пленки, маркирующими устройствами и т. д. Особо высокие требования предъявляются к технологической оснастке.

Стоимость одной технологической линии для производства основных профилей составляет примерно 300 тыс. долларов, технологической оснастки — 70–80 тыс. долларов [50].

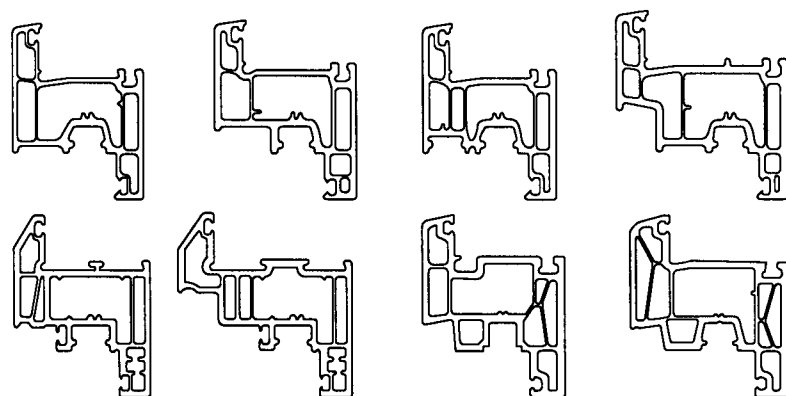




Сечения профилей коробок



Сечения профилей штупльов

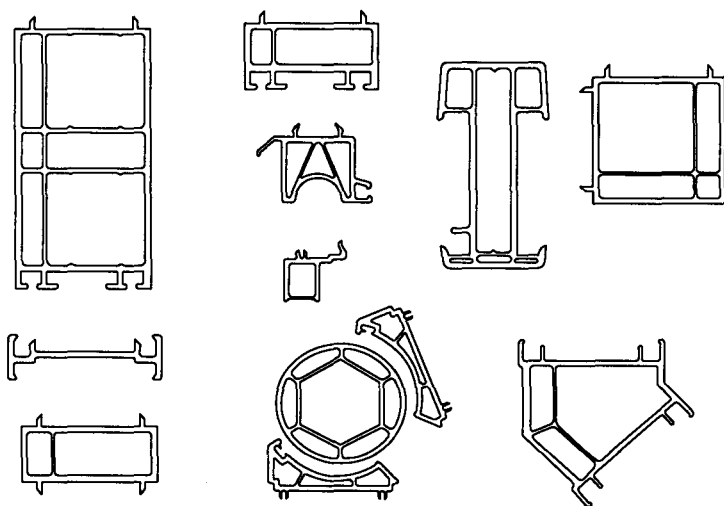


Сечения профилей створок

Рис. 8.13. Типы основных оконных профилей [41]

**SINA-PLAST**

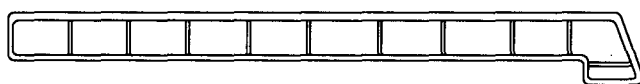
Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru



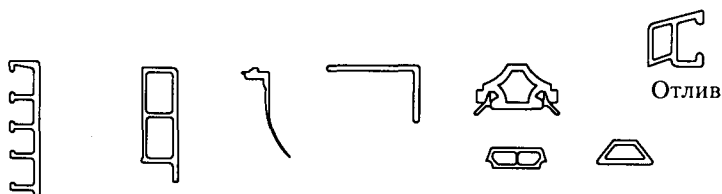
Сечения соединительных и расширительных профилей



Сечения штапиков



Сечение профиля подоконной доски



Сечения декоративных профилей

Рис. 8.14. Типы «доборных» профилей, используемые в оконных системах [41]

Основные профили оконной системы имеют массу 1,2–1,55 кг/пог. м. Более легкие профили могут, при необходимости, изготавливаться из гранулированного материала на одношнековых экструдерах. В двухшнековых экструдерах применяются цилиндрические шнеки с вращением в противоположные стороны или конические шнеки.

Наиболее известны экструдеры с коническими шнеками фирм *Cincinnati Extrusion*, *Technoplast* (Австрия), *Krauss-Maffei*, *Theysohn* (ФРГ).

Экструдеры с коническими шнеками более компактны, развивают более высокое давление по сравнению с экструдерами с цилиндрическими шнеками, обладают лучшим смесительным эффектом.

Увеличенный диаметр шнеков в зоне загрузки и соответственно повышенная поверхность нагрева позволяет лучше прогревать материал в течение относительно короткого времени и при сравнительно невысоких температурах. При этом не только исключается опасность термодеструкции материала, но и обеспечивается хорошая гомогенизация гетерогенных систем, какими являются смеси ПВХ с модификаторами. Наличие дегазации материала в целях удаления летучих веществ обеспечивает получение плотных профильных изделий без пор. Уменьшение диаметра шнеков к концу цилиндра позволяет снизить трение, а следовательно, и тепловыделения в материале даже при высоких давлениях экструзии. Система масляного термостатирования шнеков в сочетании с конструкцией шнеков и развитой поверхностью теплообмена дают возможность широкого варьирования параметров процесса. Дозирующее устройство, являющееся принадлежностью любого двухшнекового экструдера, позволяет загружать как сухие смеси различной плотности, так и регенерат.

При выборе типоразмера экструдера в зависимости от массы экструдруемого профиля можно ориентироваться на рекомендации табл. 8.4, а конструкции — [51].

В конических экструдерах фирмы *Cincinnati Extrusion* применяются так называемые «суперконические» шнеки, имеющие в зоне загрузки увеличенную глубину нарезки, что позволяет увеличить производительность машины примерно на 30% при одновременном снижении энергопотребления.

Оптимальная производительность экструдеров с параллельными шнеками при производстве оконных профилей составляет 200–500 кг/ч, с коническими шнеками — 30–250 кг/ч [51].

Для термостатирования шнеков в экструдерах *Cincinnati Extrusion* применяется новая система *Cimitem*, представляющая собой тепловой насос. Передача тепла по замкнутому контуру осуществляется за счет испарения и конденсации жидкости, помещенной внутри шнеков. При этом нет необходимости в специальном масляном насосе или устройстве для нагрева и охлаждения шнеков. Система автоматически настраивается на параметры процесса, и потери энергии практически отсутствуют.

Таблица 8.4. Выбор типоразмера экструдера (*D*) для получения профильных изделий [42]

Тип экструдера	Легкие профили (масса не более 200 г/пог. м)	Средние профили (масса не более 1000 г/пог. м)	Тяжелые профили (масса более 1000 г/пог. м)
Одношнековые экструдеры	30–60	60–75	75–120
Двухшнековые с параллельными шнеками	45–60	60–90	70–110
Двухшнековые с коническими шнеками	—	50–60	50–85

Кроме того, система не требует смазки и ухода, что удешевляет эксплуатацию экструдера. На эту систему термостатирования перешли многие европейские изготовители двухшнековых машин.

Для некоторых типов рецептур, например, стабилизированных оловом, требующих охлаждения шнеков в зоне входа в головку, применение этой системы ограничено. В США, ориентирующихся главным образом на применение термостабилизаторов на основе олова, термостатирование шнеков по-прежнему осуществляют с помощью циркуляции масла.

Для увеличения срока службы рабочая поверхность шнеков экструдеров типа СМ имеет молибденовое покрытие. Износ шнеков с молибденовым покрытием в три раза ниже, чем традиционных азотированных шнеков.

Для легкого воспроизведения режимов экструзии, при которых осуществлялся выпуск качественной продукции, современные экструдеры снабжаются микропроцессорами, что значительно облегчает управление экструдером.

В России первые предприятия по выпуску оконных ПВХ-профилей были созданы в 1989 г. Возникший спрос на пластиковые окна удовлетворялся главным образом поставками из-за рубежа. В 1993–98 гг. техническое и технологическое обеспечение создаваемых сборочных оконных производств, комплектацию, поставки, маркетинг, обучение и многое другое взяли на себя иностранные фирмы, сыгравшие решающую роль в создании российской оконной индустрии [46].

К 1997 г. на российском рынке были представлены практически все ведущие европейские изготовители профильных систем. Доминирующее положение занимали немецкие фирмы: *KBE, Rehau, Veka, Aluplast, Gealan, Schuco, ARtec, Knipping, Bruggmann, Koemmerling*.

С 1996 г. началось создание современных экструзионных производств в России. В настоящее время насчитывается уже более 20 предприятий-изготовителей. Российские профильные системы несмотря на присущие им недостатки (ограниченная номенклатура, не всегда безупречное качество) оказались вполне конкурентоспособными; их доля на рынке постоянно растет. Практически все отечественные производители работают на импортном оборудовании. В Приложении 5 представлены отечественные производители оконных профилей и их производственные мощности (Приложение 6).

8.4.1.4. Сырье

Профили для оконных рам изготавливают из композиций на основе суспензионного поливинилхлорида, которые кроме полимера содержат стабилизаторы, модификаторы, смазки, мягчители, наполнители, красители. Добавки позволяют перерабатывать полимер с минимальными энергозатратами и придают ему повышенную ударопрочность, атмосферостойкость, стабильность размеров, повышенную теплостойкость.

Поливинилхлорид, используемый для изготовления оконных рам, должен удовлетворять требованиям по ударопрочности, теплостойкости, атмосферостойкости [42, 52–53]. В табл. 8.5 приведены типичные характеристики ударопрочного ПВХ.

Ударопрочность композициям НПВХ придает введение модификаторов. В 1970-х гг. наибольшее распространение в качестве модификатора получил хлорированный полиэтилен, позже к нему добавился этилвинилацетат. В настоящее время



Таблица 8.5. Свойства ударопрочного ПВХ

Характеристика	Метод испытания	Величина
Плотность, г/см ³	DIN 53479	1,4
Прочность при растяжении, МПа, не менее	DIN 53455	37
Модуль эластичности при растяжении, МПа, не менее	DIN 53457	2100
Прочность на удар при -40 °С, кДж/м ²	DIN 53453	Без разрушения
Прочность на удар падающим грузом при -10 °С	[1*]	Без разрушения
Теплостойкость по Вика, °С, не менее	DIN 53460, метод В	75
Коэффициент линейного термического расширения, К ⁻¹ (при T = 293–323 К)	—	$8 \cdot 10^{-5}$

[1*] — Груз массой 9,81 Н с высоты 1 м при T = 263 °К.

используются в основном модификаторы на основе акрилатов, одной из основных причин широкого использования которых является гораздо меньшая степень зависимости от условий переработки.

При введении в композицию модификатора ударопрочности прочность на удар материала возрастает в несколько раз. Например, композиция ПВХ без модификатора имеет прочность на удар около 5 кДж/м², при введении 6% этилвинилацетата она возрастает до 15–18, а с хлорированным полиэтиленом — до 35 кДж/м².

В процессе переработки и эксплуатации ПВХ подвергается термическим нагрузкам и действию солнечного света, вызывающим термо- и светодеструкцию материала, поэтому для него необходима защита с помощью стабилизаторов. При производстве жестких профилей из ПВХ применяют системы стабилизации на основе солей тяжелых металлов — бариево-кадмиевую, свинцово-бариево-кадмиевую, свинцовую, на основе олова или кальция и цинка. В конце 1990-х гг. с развитием имеющихся систем стабилизации и появлением новых практически перестали использовать Ba–Cd системы и ограничивать использование систем на основе свинца. На смену им приходят относительно безвредные стабилизаторы на основе Ca–Zn, потребление которых с каждым годом возрастает.

В большинстве случаев оконные профили выпускают белого цвета. Такая окраска обеспечивается двуокисью титана типа рутил. Другие типы TiO₂ дают меньшую стойкость к атмосферным воздействиям. В состав рецептур для производства оконных профилей вводят 3–6 в. ч. этого компонента.

Кроме белых можно изготавливать цветные или декорированные профили. Применяются четыре вида технологии декорирования [43, 49]:

- ламинирование — оклейка профиля декоративной пленкой; это распространенный, но не слишком хороший вариант, потому что под воздействием природных факторов рано или поздно пленка начинает отслаиваться;
- окрашивание поверхности акриловым лаком после экструзии; такое покрытие недолговечно, поскольку со временем лак стирается;

- окраска «в массе»; при изготовлении такого профиля красящий пигмент добавляют непосредственно в поливинилхлорид перед экструзией [49]; при этом используются, например, коричневые (ФРГ, Австрия) или зеленые (скандинавские страны) цвета; стоимость окрашенных окон на 50–80% выше, чем неокрашенных (белого цвета);
- окрашивание посредством соэкструзии — более долговечный и практичный вариант; при этом ПВХ с внешней стороны покрывается в головке слоем цветного полиакрилата (такая технология впервые была разработана фирмой *HT TROPLAST AG*); акриловый слой не изменяет своих свойств под действием внешних факторов (включая ультрафиолетовое излучение солнца), а также обеспечивает дополнительную защиту профиля от мелких механических повреждений; хотя изготовление таких профилей методом соэкструзии технически сложнее, они обходятся дешевле из-за экономии дорого красителя.

Кроме самих ПВХ-профилей, цветными могут быть и уплотнения. У *TROCAL* они выпускаются четырех цветов: черный, серый, белый и бежевый, причем штапики для закрепления стекла также могут иметь соэкструдированное уплотнение разного цвета.

Для снижения стоимости композиции и улучшения ее перерабатываемости в композицию вводят наполнители. Наиболее распространенным наполнителем является мел. Для профилей белого цвета используется только натуральный мелкодисперсный мел с диаметром частиц около 1 мкм. Для уменьшения абразивного воздействия мела на износ оборудования и оснастки мел подвергают специальной обработке, при которой частицы мела покрываются оболочкой из стеариновой кислоты или стеарата кальция. Необработанный мел использовать не рекомендуется, поскольку он является сильным абразивом [50–53]. В состав композиции входит 4–10 частей наполнителя. При изготовлении окрашенных профилей в композицию или не вводят мел совсем, или его содержание не превышает 1–2 в. ч.

Вопросы приготовления композиций для экструзии оконных профилей подробно рассмотрены в [52, 53]. В табл. 8.6 приведен ориентировочный состав рецептуры для производства оконных профилей.

Стоимость 1 кг ПВХ-полимера в Европе составляет примерно 0,9 долл, добавок — 2,0–2,1 долл, обработанного мела — 0,27 долл. Стоимость 1 кг композиции, приготовленной производителем профиля, составляет 1,05 долл, у стороннего производителя композиций — 1,18 долл [53].

Таблица 8.6. Примерный состав композиции для производства оконных профилей

Компонент	Содержание, в. ч.
ПВХ, К = 68–71	100,0
Комплексные стабилизаторы (маточная смесь)	5,0
Светостабилизатор <i>Paraloid</i>	5,0
Модификатор ударопрочности	7,0
Двуокись титана	4,0
Обработанный мел	5,0

8.4.1.5. Технология

Технологическая оснастка. Технологическая оснастка (или экструзионный инструмент) является важнейшей частью экструзионной линии. Именно оснастка в решающей степени определяет качество изделия и требует максимальной точности на всех стадиях ее создания, начиная от выбора стали для деталей головки и калибратора, температурных расчетов, моделирования процессов течения и охлаждения и кончая окончательной ручной доводкой, на что уходят месяцы [54].

В экструзионной головке формируется заготовка будущего профиля. От того, какими будут форма и размеры заготовки на выходе из формирующего инструмента, зависят свойства изделия. Если, например, ширина какого-либо прямоугольного канала, сопрягаемого с другими каналами в фильере, оказывается недостаточной для получения нужного размера в профиле, то фильеру и детали, с ней контактирующие, приходится изменять. И далеко не всегда это можно сделать простыми методами. В некоторых случаях проще, быстрее и дешевле сделать новую фильеру, чем пытаться исправить непригодную.

Обычно предприятия, занимающиеся производством профильных изделий, имеют набор производственных модулей, охватывающих весь диапазон размеров всех ходовых профилей, поэтому при проектировании оснастки для нового изделия не приходится все начинать с нуля. За основу берутся чертежи для изготовления какого-либо близкого по форме и размерам изделия и производится корректировка каналов головки применительно к требуемому профилю. Аналогично поступают при проектировании калибрующих устройств, что позволяет сократить время проектирования.

Поскольку точных и относительно простых методов расчета, построенных на анализе процессов, происходящих в головке и калибрующе-охлаждающем устройстве, еще не существует, приходится полагаться на эмпирические данные и опыт. Например, на фирме *Technoplast* расчеты производятся на основе табличных данных, увязывающих параметры профиля и технологического процесса. Формулы для этих расчетов являются эмпирическими и составляют предмет ноу-хау фирмы.

Вот некоторые рекомендации по оптимизации конструкции оконного профиля и экструзионной оснастки для его производства [54]:

- минимизация количества внутренних перегородок и маленьких камер;
- минимизация толщины стенок внутренних камер;
- по возможности одинаковые условия течения по поперечному сечению канала;
- по возможности одинаковая толщина стенок;
- отсутствие на внешней стороне профиля мелких шлицов или пазов.

Разумеется, эти рекомендации можно использовать не во вред функциональности профиля.

С развитием компьютерной техники и применением численного моделирования процессов проектирование технологической оснастки стало более осмысленным, точным и быстрым. Поскольку затраты на такое моделирование достаточно высоки, то старые эмпирические методы остаются и сегодня, если для решения задачи не требуется применения сложного программного обеспечения.

Конструкция современных экструзионных головок, применяемых на высокопроизводительных линиях, должна учитывать два противоположных требования: время пребывания материала в головке не должно быть большим, чтобы не вызвать разложение материала от длительного воздействия высокой температуры; малое время пребывания не позволяет стабилизировать свойства расплава, что может быть причиной ухудшения качества. Поскольку высокая производительность и малое время пребывания материала в головке являются объективной реальностью, то приходится улучшать термостабильность материала путем увеличения количества добавок или применения более эффективных стабилизирующих систем, улучшения процесса пластикации материала за счет использования новых более эффективных конструкций шнеков и т. д.

В головках для производства камерных профилей стали применять проходы (окна) для расплава в рассекателе дорнодержателя, что позволило уменьшить неравномерность течения по сечению, поскольку часть расплава проходит через окно в дорнодержателе напрямую, а остальная масса идет обычным путем через верхние окна дорнодержателя, разделенные довольно широкими спицами. При слиянии потоков общий поток становится более однородным по температуре, что благоприятно отражается на дальнейшем его поведении.

При переработке жесткого ПВХ следует учитывать, что резкие повороты и слишком острые и тупые углы могут вызвать нарушение спокойного и равномерного течения расплава и привести к большому колебанию толщины стенок профиля в результате большой разницы в скорости сдвига на отдельных участках канала, поэтому углы наклона образующих каналов к оси экструзии, по возможности, не должны превышать $30 \pm 1^\circ\text{C}$.

Операция по выравниванию скоростей наиболее ответственна в случае экструзии несимметричных полых профилей, с участками различной толщины стенок, широких профилей. Обычно эта операция осуществляется методом проб и ошибок.

Важное значение имеет степень сжатия расплава (степень сужения сечения канала) при переходе к формующей зоне. Сужение канала должно приниматься не более, чем это необходимо для сваривания разделенных спицами дорнодержателя потоков расплава.

Хотя расплавы ПВХ-композиций достаточно пластичны, тем не менее имеет место небольшое разбухание экструдата, которое зависит от состава композиции, режима течения и конструкции головки. Например, высокомолекулярные композиции без модификатора показывают меньшее разбухание; увеличение длины формующей зоны, плавный подвод расплава к формующей зоне также ведет к снижению разбухания.

Фильеры для производства сложных камерных профилей чаще всего изготавливают неразъемными с помощью электроэрозионных станков. В качестве материала для фильер используют нержавеющие износостойкие стали, например, молибденовые с содержанием Мо в пределах 16–17%. Головки должны иметь 2–3 независимых зоны терморегулирования, участки местного охлаждения не допускаются.

Температура расплава на выходе из головки должна быть ниже, чем в цилиндре экструдера, так как при перегреве материала снижается атмосферостойкость изделия.

Соотношение размеров формующего инструмента, калибрующего устройства и готовых профилей зависит от конструкции оснастки и реологических свойств рецептуры. В большинстве случаев они устанавливаются опытным путем. Для жесткого

Таблица 8.7. Примерная производительность оборудования при экструзии оконных профилей [50]

Профиль	Скорость экструзии, м/мин	Производительность, кг/ч
Рама	2,3	200
Створка	2,3	200
Импост рамы	2,3	200
Импост створки	2,3	200
Штульп	2,3	200
Штапик 24 мм	6,0	75
Штапик 5 мм	4,0	80

ПВХ высота формующего зазора примерно равна толщине профиля, ширина прямоугольного участка фильеры принимается на 5–15% больше, чем ширина соответствующего участка профиля [42]. Для более широких и толстостенных участков принимаются меньшие значения.

Система калибрования в установках для изготовления оконных профилей представляет собой несколько отдельных сухих вакуумных калибраторов длиной 200–600 мм, установленных последовательно на монтажном столе. Для уменьшения трения и интенсификации охлаждения между блоками устанавливают короткие водяные секции.

Окончательное охлаждение профилей производится в водяных ваннах с турбулентной циркуляцией воды. В вакуумной ванне устанавливаются калибрующие пластины для стабилизации формы профиля и предотвращения его продольного искривления. Такая система, запатентованная фирмой *Technoplast*, позволила существенно увеличить скорости экструзии. В табл. 8.7 приведены примерные скорости экструзии оконных профилей.

Размеры отверстия калибрующего устройства должны учитывать термическую усадку материала при охлаждении. Величина усадки в поперечных направлениях (по ширине участка и толщине стенки) различна и пропорциональна степени ориентации расплава. В отношении экструзии эта область еще недостаточно изучена, поэтому размеры калибра устанавливают экспериментально на основе практических данных. Для ПВХ термическая усадка не велика и не превышает 0,5–1,0%.

Формующие детали калибраторов рекомендуется изготавливать из нержавеющей стали, так как латунные детали с хромированной поверхностью быстро изнашиваются, что приводит к изменению размеров сечения калибратора и к отклонению изделий от установленных допусков.

8.4.1.6. Комплектующее оборудование линии

Калибрующие устройства размещаются на калибровочном столе, характеристики которого рассмотрены в главе 2. Для производства «тяжелых» главных оконных профилей используют калибровочные столы для размещения 2–6 сухих калибрующих



блоков и ванны стабилизации, длина которой в зависимости от производительности линии может достигать нескольких метров.

Стабильность и равномерность отвода профиля обеспечивает тянущее устройство. Для оконных профилей применяют гусеничные тянущие устройства тяжелого типа с длиной траков до 2,5 м. Оба трака должны быть приводными, причем необходима синхронность движения обоих траков, которую обеспечивает двигатель постоянного тока с тиристорным управлением или двигатель переменного тока с регулированием частоты переменного тока. Мощность привода тянущего устройства устанавливается из условия обеспечения тягового усилия до 20–30 кН.

Резка профилей на отрезки нужной длины осуществляется дисковой фрезой, перемещающейся по направляющим вместе с движением профиля. Для удобства работы и снижения запыленности предпочтительно использовать режущие устройства с нижним расположением ножа. При таком расположении проще отсасывать стружку и опилки при резке и соблюдать необходимые меры предосторожности.

Некоторые установки для экструзии оконных профилей включают маркирующие устройства (например, на основе струйного принтера), устройства непрерывного контроля размеров и формы профиля (фирмы *Bandera*, *Amut*, *Bausano*, Италия). Для полностью автоматизированных установок подобные устройства необходимы.

8.4.1.7. Использование отходов производства

При изготовлении оконных профилей и сборке пластмассовых окон возникают обрезки изделий, которые рассматриваются как используемые отходы производства. Обычно эти отходы применяют для производства изделий менее ответственного назначения, чем оконные профили. Однако некоторые фирмы, используя технологию соэкструзии, применяют технологические отходы в основном производстве. Например, фирма *Gealan* изготавливает из него оконные профили, которые по своему качеству ничем не уступают изготовленным из основного сырья, но зато способствуют значительной экономии ресурсов [43]. Профиль представляет собой двухслойную конструкцию, внутренняя часть которой изготавливается из вторичного ПВХ, а внешняя — из тонкого слоя прозрачного или окрашенного полиметилметакрилата. Акрилаты имеют очень хорошую атмосферостойкость, поэтому соэкструдированные профили не требуют дополнительной стабилизации, имеют привлекательный внешний вид и по цене почти такие же, как полученные по обычной технологии.

8.4.1.8. Возникающие проблемы при экструзии оконных профилей и варианты их решения

При экструзии оконных профилей, как и при производстве других видов продукции, могут возникнуть проблемы с качеством, которые необходимо оперативно решать.

В табл. 8.8 указаны основные проблемы, которые могут встретиться при экструзии оконных профилей, их возможные причины и способы устранения.

8.4.1.9. Контроль и испытание оконных профилей

Качество оконных рам из поливинилхлорида зависит от свойств материала, работы технологического оборудования, качества сборки рамы. Во многих странах требования к пластмассовым окнам определяются соответствующими нормами и стандарта-



Таблица 8.8. Проблемы при экструзии оконных профилей [55]

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Повышенная нагрузка на привод	Короткое время пластикации композиции	Уменьшить температуру в загрузочной зоне шнека, чтобы исключить преждевременное плавление материала Уменьшить температуру масла для термостатирования шнека Использовать композицию с большим временем пластикации
	Повышенное давление в головке	Увеличить температуру в головке для снижения давления Увеличить размеры отверстия в адаптере для уменьшения давления расплава на шнек Понизить производительность экструдера Увеличить температуру на цилиндре и шнеке для повышения температуры расплава Увеличить температуру на головке для уменьшения давления Увеличить размеры канала на выходе из головки Использовать композицию с большим содержанием внешних смазок
Оранжевая поверхность профиля	Повышенная подача сырья в шнеки	Уменьшить производительность дозатора для уменьшения загрузки шнеков
	Низкая температура расплава Неравномерное течение или загрязнение расплава Высокая линейная скорость экструзии	Увеличить температуру на цилиндре и шнеке Очистить экструдер, поскольку он сам может быть источником загрязнения Уменьшить скорость Увеличить температуру масла для термостатирования шнеков
Температурная неоднородность расплава по периметру	Недостаточное пластицирование материала до зоны дегазации	Увеличить температуру в зоне загрузки Увеличить температуру масла в шнеках
Наличие небольших непроплавленных частиц	Плохое смешение в зоне дозирования шнеков	Уменьшить размеры канала на выходе из головки

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Шероховатость боковых поверхностей профиля		Увеличить температуру на головке
Зернистая поверхность профиля	Плохая дегазация материала	Увеличить температуру расплава
	Высокая температура воды, подаваемой в вакуум-насос	Проверить, не застряло ли что в головке
	Высокая температура расплава	Увеличить вакуум в зоне дегазации
	Легучие из расплава осаждаются в зоне дегазации	Проверить работу подающей воду магистрали, зоны дегазации, вакуум-насоса, фильтров
	Высокая линейная скорость экструзии	Уменьшить температуру на цилиндре и на шнеках
		Уменьшить температуру в зоне загрузки
Стреловидные следы на поверхности профиля	Слишком длинный период пластикации материала	Уменьшить скорость отвода или отрегулировать зазор в головке и в калибраторе
		Увеличить температуру в зоне загрузки
Блестки, пузыри	Мало давление на входе в головку	Увеличить температуру масла, подаваемого в шнеки
	Повышенная влажность материала	Уменьшить сечение отверстия в адаптере
		Подогреть и подсушить материал перед переработкой
	Резкое изменение перепада давления в формирующем инструменте	Увеличить вакуум
	Низкая температура расплава	Изменить размеры отверстия на выходе
Углубления, раковины на поверхности профиля	Низкая температура на головке (небольшие следы)	Увеличить температуры по зонам экструдера
	Низкая температура в первом блоке калибраторов	Увеличить температуру на головке
	Недостаточный вакуум	Увеличить температуру или уменьшить расход воды, подаваемой на первый блок
Рябь по длине профиля в отдельных местах	Попадание воды на профиль в первом калибраторе	Постепенно увеличить вакуум
		Проверить работу первого калибратора

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Случайное расположение ряби на поверхности	Образование пузырьков воздуха в ванне на участке между первым и вторым калибратором	Увеличить расход или температуру воды в ванне
Низкий глянец	Низкая температура расплава Профиль рано попадает в воду Слишком холодный первый калибратор	Увеличить температуру на цилиндре и/или головке Задержать контакт с водой Увеличить температуру в первом калибраторе Уменьшить расход воды на первый блок калибраторов Требуется некоторое время работы калибратора
Полосы, риски на поверхности	Используется новый еще не притертый калибратор Высокий вакуум Слишком холодный первый калибратор Слишком холодная вода для охлаждения	Уменьшить вакуум в калибраторе, не допуская изменения размеров профиля Увеличить температуру калибратора Увеличить температуру воды
Низкая прочность на удар у профиля	Низкая температура расплава Повышенная влажность композиции Материал в зоне дегазации находится в расплавленном состоянии и закупоривает вентиляционное отверстие	Увеличить температуру в цилиндре экструдера Проверить состояние материала в бункере экструдера (по сыпучести, наощупь) Проверить работу зоны дегазации Увеличить температуру в зоне загрузки экструдера Уменьшить температуру в зоне загрузки
Искривление профиля влево	Неравномерный выход расплава из головки Недостаточное охлаждение Большой расход воды на входе в ванну с правой стороны	Откорректировать геометрию отверстия на выходе Увеличить охлаждение с левой стороны калибратора или уменьшить с правой Отрегулировать расход
Посторонний стук	Неправильно закреплен калибратор в ванне Высокий вакуум (поэтому возникают полосы)	Отрегулировать крепление Уменьшить вакуум в калибраторе

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
<p>Неожиданный неравномерный выход расплава из головки</p> <p>Отложение выделяющихся из расплава паров на поверхности калибратора</p>	<p>Проблемы в работе тянущего устройства</p> <p>Слишком холодная вода и профиль быстро изменяет размеры из-за усадки</p> <p>Профиль слишком рано попадает в воду</p> <p>Слишком холодный первый калибратор</p> <p>Малы размеры отверстия уплотнительной прокладки на выходе из ванны</p> <p>Слишком высокая температура на головке</p>	<p>Низкое давление воздуха для нормального прижатия в траках, проскальзывание</p> <p>Нестабильная работа привода тянущего устройства</p> <p>Застревание профиля в калибраторе из-за повышенных размеров</p> <p>Увеличить температуру воды</p> <p>Задержать попадание в воду до образования в калибраторе твердой корки на поверхности профиля</p> <p>Отрегулировать температуру</p> <p>Расширить или сменить уплотнение</p> <p>Проверить термопары и регулирующие приборы терморегулирования</p> <p>Проверить температуры по зонам цилиндра</p> <p>Проверить работу всех нагревателей на цилиндре экструдера</p> <p>Проверить работу нагревателей на головке</p> <p>Проверить и отрегулировать зазоры</p> <p>Проверить и очистить</p> <p>Увеличить пластикацию материала в зоне загрузки шнеков, но умеренно</p> <p>Увеличить температуру расплава до 200–205 °С</p> <p>Увеличить температуру первого калибратора. Повышенное охлаждение увеличивает отложения</p> <p>Большинство дефектов типа <i>plate-out</i> (высаживание) возникает в первом калибраторе и передается вместе с профилем на последующие блоки</p>
	<p>Изменились зазоры между шнеками</p> <p>Что-то застряло в головке</p> <p>Множество различных причин</p>	

ми. Например, *RAL-PC 716/1* (ФРГ) контролирует качество пластмассовых оконных переплетов; *GKV* (ФРГ) — стандарт на испытание и оценку качества пластмассовых оконных профилей; *UEATC* (Англия, Голландия, Франция, ФРГ, Австрия и др.) — норма на окна из жесткого ПВХ. Испытания окон периодически проводятся независимыми контролирующими организациями.

Физико-механические свойства отечественных оконных профилей регламентируются ГОСТом 30673-99 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков». В табл. 8.9 приведены требования к оконным профилям.

Контроль качества оконных профилей осуществляется в двух направлениях: на соответствие формы и размеров профиля установленным допускам и оценка физико-механических свойств, зависящих от исходных свойств сырья и технологических параметров процесса, определяющих уровень желатинизации материала. Первый вид контроля обычно осуществляется на заводе-изготовителе, хотя выборочный контроль может проводить и потребитель. Второй вид контроля проводят в основном в специализированных лабораториях у изготовителя.

Изготовитель периодически контролирует внешний вид экструдированного профиля (отсутствие продольных рисок, вмятин, загрязнения, изменение цвета и пр.), прямолинейность отрезков (отклонение от прямолинейности не должно быть более 0,15% от длины отрезка), отсутствие скручивания (допускается скручивание не более 0,1 мм на 1 м длины), плоскостность основных поверхностей (отклонение не должно превышать 0,2 мм), перпендикулярность наружных и внутренних стенок к главным поверхностям (оценивается с помощью шаблонов).

Таблица 8.9. Физико-механические свойства оконных профилей из ПВХ [41]

Наименование показателя	Значение
Прочность при растяжении, МПа, не менее	37,0
Модуль упругости при растяжении, МПа, не менее	2100
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , не менее	15,0
Температура размягчения по Вика, °С, не менее	75
Изменение линейных размеров после теплового воздействия, %, не более:	
для главных профилей и штапиков	2,0
разность в изменении линейных размеров по лицевым сторонам	0,4
для доборных профилей	3,0
Термостойкость при 150 °С в течение 30 мин	Не должно быть вздутий, трещин, расслоений
Стойкость к удару при отрицательной температуре	Разрушение не более одного образца из десяти
Изменение цвета белых профилей после облучения в аппарате «Ксенотест», порог серой шкалы, не более	4
Изменение ударной вязкости после облучения в аппарате «Ксенотест», %, не более	20

Кроме того, внутренние размеры камер профиля должны соответствовать размерам металлических усиливающих профилей, для чего производится контроль с помощью отрезка такого профиля [42]. Фактические размеры профиля заносят в специальные карты, на которых изображен чертеж профиля со всеми размерами и контролируемыми допусками. Допуски на размеры могут изменяться в зависимости от типа и размеров профиля, но для толщины стенок действует единое правило: $+0,3$ и $-0,1$ мм для наружных стенок, $+0,1$ и $-0,3$ мм для внутренних стенок. Прямолинейность, угол скручивания, плоскостность, перпендикулярность сторон, легкая установка усиливающего металлического профиля — обязательные испытания для главных камерных профилей оконной системы. В некоторых случаях проверяют цвет профиля (с помощью колориметра), установку уплотнительных профилей, крепление арматуры и т. д.

Физико-механические испытания проводятся на образцах профилей, отбираемых дважды в день от всех производственных линий, для контроля конкретной партии изделий. Кроме того, проводится периодический контроль (раз в неделю или в месяц) на соответствие факультативным показателям для оценки стабильности производства.

При ежедневном контроле визуально оценивают:

- внешний вид профиля;
- массу 1 п. м (допускается колебание в пределах 4–7% от среднего веса);
- для основных профилей оконной системы проводится «ацетоновая проба» (образец погружают в ацетон и наблюдают за его изменением; хороший профиль не должен подвергаться заметным изменениям в течение 5 ч);
- усадку при прогреве (при нагреве до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч продольная усадка не должна превышать 2%);
- прочность на удар падающим грузом (экспресс-метод, позволяющий оценить как конструкцию самого профиля, так и правильность поддержания параметров технологического процесса; при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ или $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ для груза в 1 кг, падающего с высоты 1 м, допускается только один разрушенный образец из десяти; возможны другие условия испытания: температура -15 или $23\text{ }^{\circ}\text{C}$; другая масса или высота падения; изменение расстояния между опорами, радиуса полусферического груза; испытания при изменении высоты падения груза и т. д.).

Иногда проводят другие испытания на удар: испытание по Шарпи надрезанного образца (широко распространен в ФРГ; этот метод хорошо оценивает концентрацию и распределение полимерного модификатора; результаты сильно зависят от радиуса надреза); испытание на ударное растяжение (метод чувствителен к случайным царапинам, надрезам, микротрещинам).

К периодическим испытаниям, проводимым в специальных лабораториях, относятся также определение плотности материала, температура размягчения по Вика, оценка времени термостабильности. Эти испытания характеризуют правильность состава композиции и режима ее приготовления.

На готовых оконных рамах изготовитель (или потребитель) проверяет эксплуатационные показатели изделия: величину сопротивления теплопередаче, водонепроницаемость, тепло- и звукоизоляцию, стойкость к старению. Последний вид испытания проводится как в натуральных условиях (например, при интенсивном воздействии

солнечного света в течение длительного времени), так и в условиях лаборатории на приборах, имитирующих эксплуатационные условия (ксенотестах). В ФРГ и Австрии такие испытания проводятся в соответствии с *DIN 53387*. Интенсивность облучения в приборе устанавливается на уровне 1000 Вт/м^2 при длине волн излучения в пределах 300–830 нм. Температура испытания 45°C ; пробы материала каждые 17 мин подвергаются искусственному дождеванию в течение 3 мин при относительной влажности воздуха 60–80%. Испытание проводится до суммарного облучения $0,8 \text{ МВт/с/м}$ [41, 42, 48]. Общая продолжительность облучения составляет 45 000 ч, проба в процессе испытания должна вращаться. В процессе испытания оценивают изменение цвета с помощью так называемого серого масштаба по *DIN 54001*. Изменение окраски не должно выходить за пределы 3-й ступени серого масштаба.

При испытании в ксенотесте оценивают также изменение прочности на удар. Допускается снижение начальной прочности не более чем на 20–30 %. Испытания на удар при низких температурах необходимы для оценки возможности установки оконных рам зимой. Нормы испытания отличаются только временем кондиционирования образцов и самой температурой испытания.

Качество сварки рамы оценивается испытанием угловых стыков путем растяжения, удара или сжатия.

8.4.1.10. Дверные панели из пено-ПВХ

Коробки балконных дверей также монтируют из оконных профилей, кроме того, в последнее время предлагают изготавливать из пластмасс внутренние двери. Существует много различных вариантов конструкций, большинство из которых представляет собой сэндвич-панели с пенообразным наполнителем, однако встречаются и цельковые дверные панели в виде широкого камерного профиля (по типу пластмассовых подоконников) или сплошного профиля из пено-ПВХ. Коробка двери выполняется из

Таблица 8.10. Дверные панели из пено-ПВХ фирмы *Friul Filiere*, Италия

Характеристика изделия	Величина
Продукция	
Плотность, г/см^3	0,6–0,7
Масса 1 п. м, кг ($800 \times 35 \text{ мм}$)	6,5
Ширина панели, мм	700–800–900
Толщина панели, мм	35–40–50–60
Оборудование	
Массовая производительность, кг/ч	200–400
Скорость экструзии, м/мин	0,3–1,0
Потребляемая мощность, кВт	90
Потребление воды в закрытой системе, л/ч	6000
Холодильник для охлаждения панели, кг/ккал	40 000–80 000
Длина линии, м	23

Таблица 8.11. Свойства панелей из пено-ПВХ, используемых для изготовления дверей

Характеристика	Метод испытания	Величина
Плотность, кг/дм ³	DIN EN ISO 845	500 ± 5%
Водопоглощение при T = 50 °C в течение 48 ч, %	ASTM D570	0,28
Прочность на удар падающим грузом (шар)	DIN EN 950	Диаметр отпечатка 11,0 мм, глубина 0,16 мм
Испытание на огнестойкость	UL 94V	Класс самовоспламенения 94 V-0
Температура размягчения по Вика в масле при нагрузке 10 Н, °C	DIN EN ISO 306	77
Теплопроводность при 10 °C, Вт/(м ² · К)	ISO 8302:1991-08	1,7
Звукоизоляция, дБ	DIN EN ISO 717-1	26

специальных профилей по конструкции близких к оконным профилям. В табл. 8.10 представлены характеристики таких дверных панелей и оборудования для их производства итальянской фирмы *Friul Filiere* (<http://www.friulmac.com>). Панели производятся с помощью химического вспенивания на основе процесса *Celuka* (вспенивание внутрь). В линии для экструзии пенопанелей встроена установка для декорирования поверхности пленкой под различные породы дерева.

Характеристики пенопанелей приведены в табл. 8.11, а свойства пено-ПВХ, используемого для их изготовления, — в табл. 8.12.

8.4.1.11. Подоконники

Принадлежностью любого окна является подоконник, который может быть изготовлен из материала одного из четырех типов: ДСП, дерево, полимерно-мраморные, полимерные [56].

Древесно-стружечные плиты ДСП — монолитный материал с высокой жесткостью, имеет гладкое покрытие; ламинат устойчив к воздействию бытовых химических средств, а также к нагреванию от утюгов, чайников и прочего, не изменяет прочности при примыкании к отопительным приборам и не выделяет при этом вредных веществ. Ламинат ДСП всегда матовый, не дающий бликов от солнца.

Деревянные подоконники требуют обновления покрытия и впитывают влагу из-за гигроскопичности дерева. Для подоконников важным показателем является влагостойкость, поскольку в его защитном покрытии всегда есть повреждения торцов от транспортировки и монтажа, а под окном всегда присутствует влага в капельном или парообразном состоянии.

Полимерно-мраморные подоконники прочны, гладки и химически стойки. К недостаткам этого типа относятся высокая цена, бликование на солнце, необходимость оправдать в интерьере «каменный» дизайн.

Таблица 8.12. Свойства пено-ПВХ для изготовления дверных панелей

Характеристика	Метод испытания	Величина
Плотность, г/см ³	ASTM D792	0,50–0,65
Водопоглощение при $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 48 ч, %	ASTM D570	0,28
Прочность при изгибе, МПа	ASTM D790	36
Модуль упругости при изгибе, МПа	ASTM D790	1300
Предел текучести при растяжении, МПа	ASTM D638	15
Прочность при разрыве, МПа	ASTM D790	11,5
Ударная вязкость по Шарпи при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, кДж/м ²	ISO R179	18
Ударная вязкость по Шарпи при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, кДж/м ²	ISO R179	17,5
Температура деформации под нагрузкой, $^{\circ}\text{C}$	ASTM D790	65
Температура размягчения по Вика (при нагрузке 1 кг, испытание в масле)	ASTM D1525	83,5
Твердость по Шору А	ASTM D676	92
Огнестойкость	UL 94	«Огненная крыша»
Коэффициент термического расширения, см/(см · $^{\circ}\text{C}$)	ASTM D696	5,5–10,5
Теплопроводность, Вт/(м · град)	ASTM D 2326	0,072
Диэлектрическая постоянная при частоте 60 цикл/с, температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности 50%	ASTM D150	2

Полимерные подоконники изготавливают из жесткого ПВХ в виде широких камерных профилей с прямоугольными или треугольными ячейками или из вспенивающегося ПВХ в виде монолитного профиля.

Подоконники ПВХ по оформлению делятся на внутренние и наружные. Они предназначены для монтажа на старых каменных и бетонных подоконниках, устойчивы к влиянию влаги, температуры, ультрафиолетового излучения, не горят, не требуют шлифовки и покраски. Наружные подоконники покрываются с помощью соэкструзии твердым атмосферостойким верхним слоем; торцы пустотелых профилей закрываются специальными пластмассовыми заглушками, предотвращающими попадание внутрь влаги и грязи.

На отечественном рынке представлено большое количество подоконников разнообразных форм (камерные с прямоугольными ячейками с одним или двумя капиносами; камерные с треугольными ячейками с одним или двумя капиносами; сплошные из пено-ПВХ), размеров (от 200 до 800 мм с возможностью продольной резки с шагом 50 мм) и отделки (с покрытием декоративной пленкой разных цветов и текстуры, с покрытием меламиновой пленкой, с атмосферостойким покрытием, наносимым соэкструзией) [56–66].

На рис. 8.15 показаны виды производимых подоконников из ПВХ.

Монтаж подоконников производится с помощью цементного раствора, шурупов-саморезов или клея (или монтажной пены). В первом случае следует зафиксировать подоконник в строительном растворе, используя продольные пазы с профилем типа «ласточкин хвост» на нижней поверхности подоконника. Для фиксации подоконни-

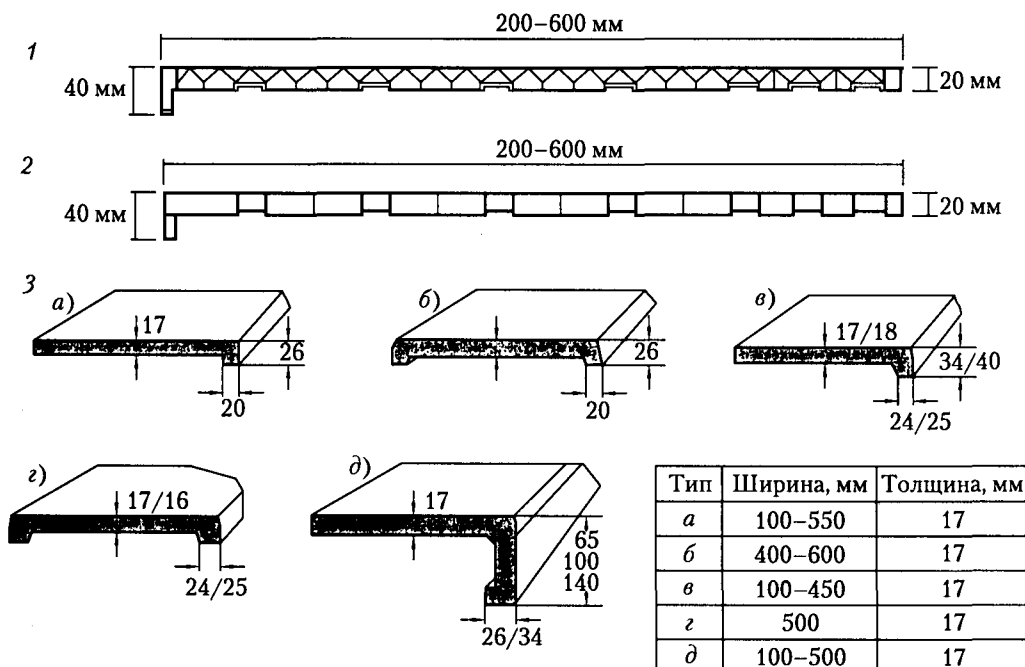


Рис. 8.15. Формы подоконников из пластмасс:

1 — с треугольными ячейками; 2 — с прямоугольными ячейками; 3 — сплошные из пено-ПВХ (фирма *Werzalit*): а — подоконник 26 мм, $B = 100-550$ мм; б — с двойным профилем, $B = 400-600$ мм; в — подоконник 34 мм, $B = 100-450$ мм; г — типа «Эсклюзив», $B = 500$ мм; д — с планкой, $B = 100-500$ мм

ка с помощью клея или монтажной пены необходимо установить вертикальную распорку в проеме, чтобы предотвратить выдавливание подоконника при взбухании пены. При креплении с помощью шурупов-саморезов на уголках или на кронштейнах батарей отопления рекомендуется оставить пространство не менее 10 см между батареей и нижней поверхностью подоконника.

При отделке торцов подоконных плит используются специальные заглушки, крепящиеся на клей.

Из поставляемых по импорту наиболее известны подоконники фирмы *Moeller* (Германия), *Venta* (Бельгия), *Rehau* (Австрия).

Подоконники фирмы *Moeller* имеют прочную структуру, поверхность подоконников оклеивается меламиновой пленкой, что придает подоконникам эстетичность и практичность [56]. Меламиновая пленка имеет ряд преимуществ перед пленкой ПВХ:

- высокая устойчивость к образованию царапин, повышенная твердость и износостойкость;
- высокая устойчивость к воздействию активных реагентов (кипяток, уксусная кислота, химические реагенты и т. д.);
- повышенная свето- и термостойкость;

- легко моется;
- устойчива к кратковременному воздействию высокой температуры (например, к поджогу сигаретой);
- имеет хорошую механическую прочность;
- является экологически чистым продуктом.

Отличительными особенностями подоконников фирмы *Venta* являются [62]:

- повышенная стойкость к влаге и к действию микроорганизмов позволяет использовать подоконник в помещениях при нарушении норм влажности и температуры (сырые дома и производственные помещения);
- твердая ламинированная поверхность отличается высокой стойкостью к царапинам и ударам;
- подоконники имеют прочную сотовую конструкцию, мало подвержены усадке и имеют низкий коэффициент теплового расширения;
- масса подоконников из ПВХ значительно меньше, чем у подоконников из древесно-стружечных плит, благодаря чему отсутствует опасность повреждения во время транспортировки или на стройплощадке.

Подоконники фирмы *Rehau* (Австрия) [63] отличаются высокой ударной вязкостью при низких температурах и превосходят по своим теплоизоляционным свойствам подоконники из дерева или натурального камня. Композиция ПВХ для производства подоконников, которую фирма готовит на своем предприятии, имеет плотность $1,45 \text{ г/см}^3$, обладает высокой ударной вязкостью; диапазон рабочих температур от -30 до $+60^\circ\text{C}$, относится к трудногорючим пластмассам; теплоизоляционные свойства сравнимы с оконными профилями из ПВХ и превышают свойства подоконников из дерева, бетона или камня; линейный коэффициент теплового расширения: $8 \cdot 10^{-5} \text{ м/}^\circ\text{C}$.

Покрытие подоконника устойчиво к абразивному воздействию, к истиранию, к воздействию света, к химическому воздействию; выдерживает тест на прожигание по *DIN EN 438*.

Сплошные подоконники фирмы *Werzalit* (Германия) из пено-ПВХ стойки к царапинам, вмятинам и истиранию; влагостойки, имеют высокую прочность и небольшую массу, стабильны по размерам в процессе эксплуатации, допускают обработку обычным деревообрабатывающим инструментом и достаточно просто монтируются. Могут выпускаться с различной окраской: белый, светло-серый, светло-бежевый, под мрамор, под дуб, красное дерево и др. [60].

Подоконники из древесно-волоконистого полимера, впервые изготовленные по технологии «жидкое дерево» фирмой *Technoplast*, в нашей стране пока не нашли широкого распространения. Более подробно эта технология рассмотрена в главе 7.

Первый отечественный подоконник из ПВХ был изготовлен более 10 лет назад предприятием «Народный пластик», входящим в большую группу фирм «Стройэлектро» [64]. Оборудование и оснастка для производства подоконника шириной 600 мм были закуплены у фирмы *Technoplast* (Австрия).

Позже подоконники стали производить другие отечественные предприятия: *Global Shield* (Народные окна), Альта-Профиль, Реас Пласт, *Proplex*, Пласткомплект-Т, РББК, Терна Полимер (Москва и Московская обл.) и др. На первых пяти предприятиях установлено оборудование фирмы *Technoplast*.

Типовая линия для производства подоконников рассчитана для изготовления широких изделий и включает:

1. Двухшнековый экструдер с системой загрузки сырья, системой управления экструдером и шкафом тепловой автоматики.
2. Широкощелевую экструзионную головку для изготовления подоконника шириной 600–800 мм.
3. Калибровочный стол длиной 4–5 м и шириной 1,2–1,5 м с несколькими (до 6 шт.) водокольцевыми вакуум-насосами для установки блоков (2–6 шт. в зависимости от производительности экструдера и длины блоков калибраторов). Обычная длина блоков калибраторов — 300–400 мм. В линию может быть встроено устройство для покрытия подоконника защитной пленкой или ламинирования.
4. Широкое или сдвоенное (строенное) траковое тянущее устройство с саморегулирующейся верхней гусеницей для прижатия профиля и равномерного его отвода. Усилие, преодолеваемое тянущим устройством, может составлять до 4–5 т. Мощность приводного двигателя постоянного или переменного тока с регулируемой частотой составляет 4–5 кВт.
5. Режущее устройство с поперечной дисковой пилой диаметром 450–550 мм. Устройство позволяет резать профили или панели шириной до 900 мм и толщиной до 40 мм. Стружка и пыль при резке автоматически удаляется пылесосом.
6. Для продольной резки широкой панели дополнительно устанавливается продольная пила, которая настраивается на нужную ширину подоконника.
7. Приемное устройство для приемки длинных (до 6 м) прямолинейных отрезков профиля.

Линия может производить широкие панели со скоростью до 1–1,5 м/мин.

Подобные линии изготавливают крупные известные фирмы: *Cincinnati Extrusion*, *Technoplast* (Австрия), *Battenfeld*, *Krauss-Maffei* (Германия), *Amut*, *Luigi Bander* (Италия).

Подоконники с покрытием декоративной ПВХ- или меламиновой пленкой в настоящее время производят ряд российских предприятий: Народный пластик, Альта-Профиль, Реас Пласт, Терна-Полимер, Полимеркомплект-Т (Москва и Московская обл.).

Особенностью технологического процесса производства подоконников, применяемого фирмой Реас Пласт (Москва) на оборудовании фирмы *Technoplast* (Австрия), является ламинирующая установка, встроенная в продолжение экструзионной линии [65]. Все процессы синхронизированы. На ламинирующей установке последовательно выполняются следующие операции: обдув подоконной доски воздухом (для удаления с поверхности частиц воды и пыли), нанесение на доску грунтовки *Kleiberit*, параллельно на декоративную пленку наносится клей *Kleiberit*, затем пленка валиками прикатывается к подоконной доске, после чего производится поперечная резка профиля.

Требования к подоконникам регламентируются ТУ 5772-002-52618577-01, общие требования к форме, размерам и методам испытания — по ГОСТу 30673-99 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков».

8.4.2. Пластмассовые панели

8.4.2.1. Виды панелей

Одним из видов строительных материалов являются пластмассовые панели различной ширины и отделки. В настоящее время они применяются для покрытия стен и потолков в жилых, производственных, офисных помещениях.

Панели разделяются на узкие (шириной 100–125 мм) и широкие декоративные (200–300 мм). Узкие чаще используются для внутренней и наружной облицовки стен домов, производственных и служебных помещений, широкие декоративные — для облицовки жилых помещений (ванных комнат, прихожих, кухонь, туалетов и т. д.).

На рис. 8.16 показаны самые распространенные панели шириной 100–125 мм с пазом (имитация узкой «вагонки») и без паза (имитация широкой вагонки) и комплектующие профили для установки вагонки [67, 68]. У производителей пластмассовых профилей это одно из самых распространенных изделий.

«Виниловую вагонку» производят многие предприятия Москвы и Московской области, а также других городов. Среди них «Альга-Профиль», НПО «Пластик», «РЕАС Пласт», *AluPlast*, «СтройПолимер» и др.

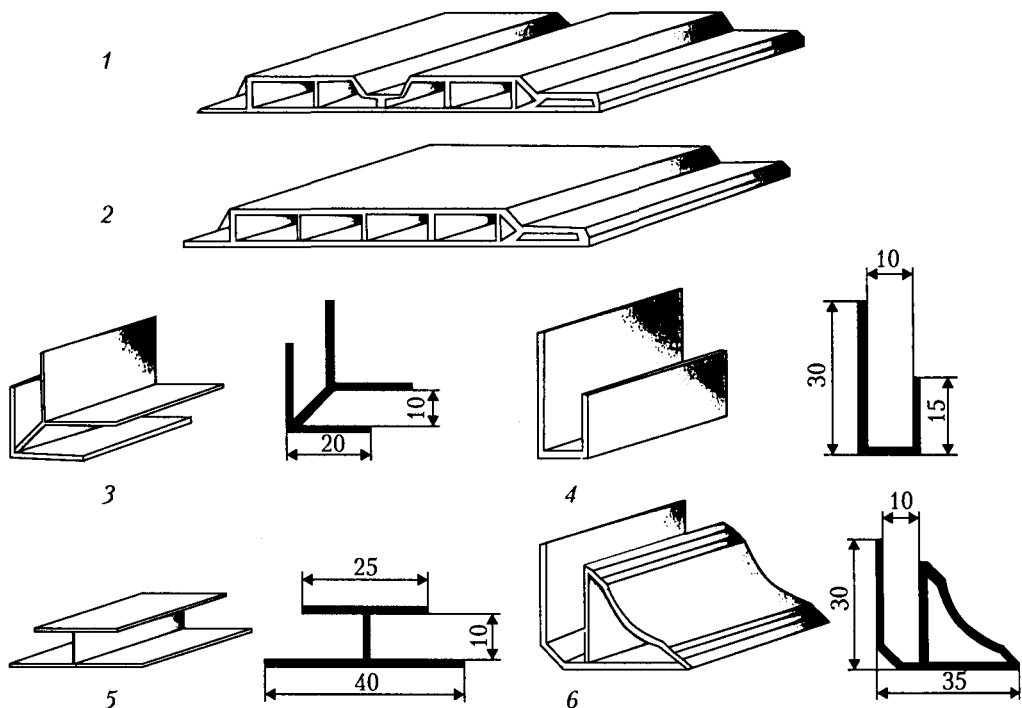


Рис. 8.16. Облицовочная панель-вагонка и комплектующие профили:

1 — стеновая панель с впадиной; 2 — стеновая панель гладкая; 3 — угол наружный;

4 — планка (L-профиль); 5 — соединение (H-профиль); 6 — плинтус

Крупнейший производитель виниловой вагонки компания «Альта-Профиль» производит вагонку из НПВХ с 1999 г., поэтому процесс ее изготовления отлажен и стабилен, а качество высокое. В это же время начало производить вагонку и НПО «Пластик».

Профили выпускаются белого цвета или окрашенными в массу в серый, салатовый, бежевый и другие цвета. Состав рецептуры ПВХ, используемой для производства вагонки в компании «Альта-Профиль», такой же, как и для выпуска внешней облицовки «сайдинг» [69]. Прежде всего это различные модификаторы и стабилизаторы, обеспечивающие повышенную ударопрочность, морозо- и цветостойкость. Более подробно свойства и производство сайдингов рассмотрены в разделе 8.5 главы 8.

Для монтажа пластмассовая вагонка комплектуется отделочными планками: соединительными, потолочными, торцевыми F-профилями и другими, вид которых показан на рис. 8.16. ПВХ-вагонка «Альта-Профиль» прошла полный цикл испытаний на устойчивость к климатическому старению по специальной программе. Результаты испытаний ее эксплуатационной устойчивости подтверждают минимальный срок службы этих изделий по цветовым характеристикам 15 лет при температуре от -50 до $+60$ °С. ПВХ-вагонка «Альта-Профиль» сохраняет декоративные и прочностные свойства на разрыв после 60 циклов испытаний на морозостойкость. Испытания на стойкость к удару показали отсутствие разрушения панелей при минусовой температуре.

В отличие от сайдинга, облицовка стен вагонкой представляет собой сплошное покрытие без вентиляционных отверстий. Вентиляция стен осуществляется за счет монтажа профилей не непосредственно на стены, а на горизонтальные или вертикальные деревянные планки, благодаря чему пространство между стеной дома и вагонкой продувается.

«Альта-Профиль» является также крупнейшим в России производителем широких панелей [70]. Компания одной из первых начала производить печатно-лакированные панели с декоративной отделкой шириной 200 и 300 мм и высотой 10 мм. Для придания декоративных характеристик на панель наносится рисунок методом трехцветной флексографии. Чтобы его закрепить или придать поверхности глянец, панели покрываются специальным лаком.

Продукция шириной 200 мм выпускается с видимым декоративным швом, панели шириной 300 мм стыкуются между собой без видимого шва.

Освоен также выпуск панелей шириной 250 мм методом термопереводной печати с перенесением цветовых рисунков на панель ПВХ путем термического контакта специальной пленки-носителя рисунка с панелью. Цветные панели, полученные таким методом, не требуют дополнительных операций по закреплению нанесенного цветового слоя и отличаются высокой устойчивостью к истиранию.

Декоративные панели из НПВХ изготавливаются из композиций, состоящих из полимера отечественного производства и импортных добавок ведущих западных производителей. Они долговечны, влагостойки, выдерживают значительные механические нагрузки, обладают высокой теплостойкостью и хорошей звукоизоляцией.

Их монтаж не требует профессиональных навыков. Благодаря конструкции шпунтов и пазов они легко входят друг в друга и закрепляются с помощью гвоздей, винтов, шурупов-саморезов, заклепок или монтажного клея. Для отделки углов и потолков используются комплектующие профили соответствующей цветовой гаммы. Состы-

кованные панели имеют эффект ровной бесшовной поверхности. Широкие стены облицовываются панелями стандартной длины (2700 мм), разделяемые соединительными Н-образными профилями.

Из импортных отделочных и облицовочных профилей наиболее известны изделия бельгийской фирмы *Deceuninck* [71]. Для внутренней отделки стен и для подвесных потолков *Deceuninck* выпускает ряд панелей из ударопрочного ПВХ шириной от 100 до 300 мм в различном исполнении: белые, цветные, в оригинальном дизайне отделочного камня и ценных пород дерева. Для наружной отделки можно использовать либо обычные пустотелые профили, либо панели из интегрального пено-ПВХ, сочетающие высокую прочность с устойчивостью к механическим воздействиям при температуре до -60°C и очень низкую теплопроводность. Лицевая сторона дополнительно отделана и усилена слоем монолитного жесткого ПВХ, нанесенного методом соэкструзии. Профили компании *Deceuninck* подвергаются разнообразной внешней отделке. Это окрашивание в массу, ламинирование пленкой, нанесение печатного рисунка или специальных покрытий.

Технология ламинирования декоративной пленкой применяется как для оконных и дверных профилей, так и для строительно-отделочных профилей. Профили, ламинированные акриловой пленкой, обладают стойкостью к ультрафиолетовым лучам, могут придать окнам, дверям и всему интерьеру помещения индивидуальный облик: под красное дерево, под темный или светлый дуб, под бук, розовый и серый ясень и т. д. В процессе ламинирования профили нагревают до нужной температуры и покрывают слоем клея, затем путем термической активации на профиль наклеивают пленку с помощью прижимных роликов. В ходе производственного процесса адгезия подвергается постоянному контролю.

Для оконных и дверных профилей используется новое прочное покрытие зернистой структуры, приятное на ощупь и отличающееся простотой ухода за ним (меламиновая пленка). Покрытие наносится на каждый отдельный профиль вручную и отверждается в печи при температуре 50°C . В процессе производства для каждого профиля проверяется внешний вид, твердость и адгезия.

Для декоративных отделочных профилей применяется главным образом внешняя отделка путем нанесения печатного рисунка. Все профили подвергают кондиционированию и предварительной обработке для удаления любых загрязнений, затем с помощью печатной техники на профиль наносят различные цвета и рисунки, после чего поверхность защищают слоем матового или глянцевого лака.

8.4.2.2. Свойства ПВХ-панелей и комплектующих профилей

Как уже отмечалось выше, панели изготавливаются методом экструзии из композиций на основе ПВХ. Как правило, композиции состоят из полимера отечественного производства и импортных добавок. Основными производителями ПВХ-полимера, который используется для производства панелей, являются предприятия Волгограда, Стерлитамака, Саянска, импортных добавок — фирмы *Chemphson*, *Elnova*, *Berlocher*, *Ciba Geigy* (ФРГ). Состав и приготовление композиций ПВХ различного назначения рассмотрены в разделе 7.1 главы 7.

Технические характеристики панелей должны соответствовать нормативным документам, которые производители разрабатывают для контролируемого выпуска

продукции. Это технические условия, технологические регламенты, различные производственные инструкции. Если технологические регламенты, инструкции относятся к конкретному предприятию и являются фактически паспортом для данного вида продукции, то технические условия (ТУ) являются общим документом, в котором много общего для однотипных изделий. Вот лишь некоторые примеры ТУ на панели из ПВХ и комплектующие профили: ТУ 5772-007-39857828-00 «Профили НПВХ для наружного применения» (ООО «Стройполимер»), ТУ 5772-004-18757376-01 «Панели пластиковые с декоративной отделкой» (ООО «Альта-Пластик»), ТУ 2247-009-18425183-2002 «Изделия профильные облицовочные из суспензионного поливинилхлорида» (ОАО «НПО «Пластик»). В табл. 8.13 приведено сравнение технических характеристик вагонки по ТУ 5772-007-39857828-00 и ТУ 2247-009-18425183-02.

Характеристики, приведенные в таблице, отличаются мало, а там, где они имеют различные значения, это связано с различием методик испытания. Такие показатели нельзя сравнивать.

Прогнозируемый срок службы панелей по ТУ ООО «Стройполимер» — 10 лет, НПО «Пластик» — 10–20 лет в зависимости от состава применяемой рецептуры. Следует отметить, что прогнозируемый срок службы — расчетный показатель по вы-

Таблица 8.13. Сравнение технических характеристик вагонки разных производителей

Характеристика	По ТУ 5772-007- 9857828-00	По ТУ 2247-009- 18425183 -02
Прочность при растяжении, МПа, не менее	36,3	37,0
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	—	60
Температура размягчения по Вика, не менее	75	72
Абсолютная деформация при вдавливании, мм, не более	—	0,2
Изменение линейных размеров после теплового воздействия, %, не более	2,0	3,5
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , не менее	10*	60**
Прочность при ударе, кг · см, не менее	40	—
Ударная вязкость по Шарпи при отрицательной температуре, кДж/м ² , не менее	—	40**
Изменение цвета белых профилей после облучения в аппарате «Ксенотест»	—	Не должно быть заметных изменений
Изменение прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве после облучения в аппарате «Ксенотест», %, не более	—	30
Морозостойкость, °С, не менее	Отсутствие разрушений при –40	—

* Для образцов с надрезом.

** Для образцов без надреза.

бранному критерию. Выбор критерия и подбор статистических данных — ответственная и длительная процедура, которая не всегда может дать объективный результат. Малое количество экспериментальных точек может сильно исказить картину экстраполяции, а для набора большего количества точек требуется длительное время. В НПО «Пластик» в качестве основного критерия, по которому проводили временную экстраполяцию, принимали значение относительного удлинения при разрыве как наиболее чувствительного параметра к старению.

Требования к свойствам импортных ПВХ-панелей и комплектующих профилей более жесткие: прогнозируемый срок службы качественных ПВХ-панелей и профилей не менее 40 лет; основные показатели качества облицовочных панелей из ПВХ соответствуют нормам ASTM D3679.

8.4.2.3. Пожаробезопасность ПВХ-панелей

Большинство ПВХ-профилей (декоративные панели, вагонка, сайдинг) относятся к трудногорючим. За многолетнюю историю производства и применения ПВХ-панелей в строительстве не выявлено ни одного факта, когда бы они стали причиной пожаров или непреодолимым препятствием на пути пожарных.

Испытание пожароопасности ПВХ-панелей показывает, что ПВХ панель воспламеняется только при превышении температуры 391 °С в присутствии пламени, причем процесс этот самозатухающий и лишь при 454 °С процесс горения продолжается даже при вынесении из пламени [72]. Сравнение этих показателей при испытании на огнестойкость по ASTM D1921 показывает преимущество ПВХ-изделий перед другими строительными материалами.

Все сгораемые стройматериалы для поддержания горения требуют кислород в большей или меньшей степени. Для некоторых материалов достаточна концентрация атмосферного кислорода, для других требуется значительно большая концентрация. Показатель процентного содержания кислорода в воздухе, при котором образец сгорает до конца, называется кислородным индексом материала; методика его определения приводится в ASTM D2863. Чем выше кислородный индекс материала, тем трудней он горит: у чистого ПВХ он достигает 45–49, у композиции НПВХ, в состав которой введены антипирены, повышающие огнестойкость материала, и из которой и изготавливают панели, вагонку, сайдинг и другие строительные профили, он достигает 60. Кислородный индекс некоторых горючих материалов приведен в табл. 8.14.

Таблица 8.14. Кислородный индекс различных горючих материалов

Материал	Кислородный индекс	Материал	Кислородный индекс
ПВХ	47–49	Вискоза	18,7–18,9
Кожа	34,8	АБС-пластик	18,3–18,8
Резина неопреновая	26,3	Полистирол	17,6–18,3
Поликарбонат	26–28	Полиэтилен	17,4
Шерсть	25,2	ПММА	17,4
Полиамид 6.6	24–29	Натуральная резина	17,2
Древесина	19	Хлопок	16–17

Приведенные данные касаются лабораторных образцов и строгих методик испытаний, поведение материалов при реальном пожаре может отличаться от лабораторных испытаний. Тем не менее кислородный индекс наилучшим образом характеризует способность материала поддерживать горение: чем выше этот показатель, тем выше пожарная безопасность материала.

Другой важный показатель огнестойкости материала — скорость распространения горения, который определяется по поверхности образцов в туннельной печи по методике *ASTM E 84/CAN 4-S102.2*. Показатель этот условен, но нагляден для определения пожароопасности стройматериалов: для стального листа — 8; для алюминиевого листа — 8; для сосновой вагонки — 51; для шифера — 63; для ПВХ-панели или профиля — 21 [72]. Преимущество ПВХ-панелей по этому показателю очевидно: изделия из этого материала не превышают степень возгораемости различных стеновых материалов.

Продуктами горения ПВХ-панелей являются двуокись углерода CO_2 , окись углерода CO и хлористый водород HCl . Все эти вещества образуются и при горении других строительных материалов. Из них наиболее опасна окись углерода, поскольку она неразличима человеческим обонянием, бесцветна и при определенной концентрации почти мгновенно приводит к летальному исходу, причем при сгорании обычной древесины ее выделяется гораздо больше, чем при сгорании ПВХ, несмотря на распространенное мнение об обратном. Хлористый водород, выделяющийся в малых концентрациях при горении ПВХ, имеет отчетливый запах, цвет и последствия его воздействия на организм не имеют необратимого характера.

Дым от всех сгораемых стройматериалов токсичен независимо от их происхождения. Это же касается и ПВХ, поэтому необходимо принимать все меры пожарной предосторожности в зданиях, облицованных как обычными деревянными досками, так и современными ПВХ-панелями и профилями.

8.4.2.4. Производство

Производство панелей типа вагонки или декоративных панелей ничем особенным не отличается от производства других строительных профилей из ПВХ. Сами панели чаще производят из порошкообразных композиций на линиях, оснащенных двухшнековыми экструдерами, а комплектующие профили — на одношнековых экструдерах из гранулированных материалов.

Обычные скорости экструзии для вагонки шириной 125 мм — 3–3,5 м/мин для одноручьвой экструзии и 2–2,5 — для двухручьевой. Применение многоручьевой экструзии для комплектующих профилей зависит от конструкции оснастки и целесообразности ее применения на конкретном оборудовании, поскольку линейные скорости экструзии большинства из них позволяют использовать производительность экструдера только на 70–80%.

Для калибрования вагонки применяют блоки сухих вакуумных калибраторов длиной 400–600 мм. Иногда устанавливают два последовательных блока, либо разделенных короткой ванной (при необходимости заполняемой водой выше верхней плоскости панели), либо поливаемых водой сверху в пленочном режиме. В этом случае при выходе из второго блока требуется осушка профиля воздухом. Отсос влаги с поверхности может производиться также во втором калибрующем блоке вакуум-насосом.

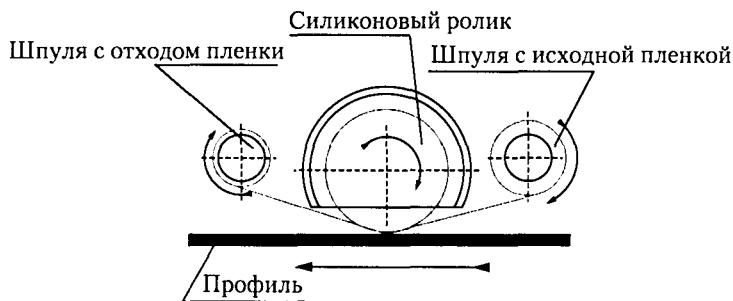


Рис. 8.17. Схема декорирования пластмассовых панелей методом термопереноса [73]

8.4.2.5. Декорирование

Нанесение декоративного рисунка на панели производится по методу термопереноса. Этим термином называют явление переноса изображения на предметы под действием температуры $150\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием специальных пленок. Метод используется для декорирования твердых поверхностей из дерева, МДФ и полимеров.

Для нанесения покрытия таким методом существует два вида установок: периодического и непрерывного действия. Машины первого типа используются для декорирования отдельных предметов (крышки, колпачки, бутылки, кружки и т. д.), второго — для погонажных изделий.

Пленка, несущая на себе изображение, прижимается к заготовке с помощью нагреваемого силиконового ролика. Под действием температуры пленка передает нанесенные на нее слои пигмента и лака на покрываемую поверхность, а прозрачный отход пленки сматывается на шпулю. Схема декорирования панелей методом термопереноса показана на рис. 8.17. Ширина нанесения покрытия $10\text{--}260\text{ мм}$, скорость — до 12 м/мин .

Оборудование для нанесения декоративных покрытий на плоские и фасонные профили имеет две модификации: встраиваемое в экструзионную линию (модульного типа) и работающее независимо.

8.4.3. Профилированный лист

8.4.3.1. Введение

Профилированный лист (ячеистый, сотовый лист, сотопласт) представляет собой широкий лист, состоящий из двух или более слоев, соединенных между собой прямыми или косыми перемычками. Используемый материал, размеры профилированного листа (ширина, количество слоев, форма и размеры ячеек, толщина стенок перемычек и наружных слоев) зависят от области применения листа.

Различают две основные области применения профилированного листа: для упаковки и для строительства.

Относительно мягкие виды листа толщиной $2\text{--}4\text{ мм}$, изготовленные по аналогии с обычным картоном и называемые соответственно картонопластом, применяются главным образом для упаковки, а жесткие ячеистые листы толщиной $2\text{--}32\text{ мм}$ широко применяются в строительстве, рекламе, сельском хозяйстве.

Оба вида профилированного листа имеют различное назначение, изготавливаются из разных материалов, технология их производства также несколько отличается, хотя по форме листа, составу используемого для производства оборудования имеется много общего. Поэтому рассмотрим оба вида продукции параллельно.

8.4.3.2. Виды профилированного листа

Картонопласт. Картонопласт — один из видов профилированного листа. Это название было введено в употребление и запатентовано в начале 70-х гг. XX в. итальянской фирмой *Совета*. В настоящее время картонопласт производится во многих странах, в том числе в Италии (фирмы *Омипа*, *Cartonplast*), Германии, США, Франции, Англии, Финляндии, Австрии, Венгрии, Израиле (фирма *Polygal*), Польше, Румынии, Эстонии, Тайланде, Сингапуре, Индонезии, России.

Картонопласт в основном предназначен для изготовления тары при упаковке пищевых продуктов, промышленных товаров, лекарств. Тара из пластмассового картона более долговечна, так как допускает многооборотность, более жесткая и прочная, хотя и несколько более дорогая [74, 75].

Размеры листа и используемый для изготовления материал определяются областью применения. Для упаковки применяют широкий лист малой высоты и с тонкими стенками и перегородками. Чаще всего его изготавливают из ПП или ПЭВП. ПП несколько более жесткий материал, чем ПЭВП, допускает использование тары при повышенных температурах (для упаковки лекарств это имеет существенное значение, поскольку тара допускает кратковременную стерилизацию при температуре, близкой к температуре кипения воды) [75]. Кроме того, ПП легче ПЭ и более технологичен.

Преимущества картонопласта по сравнению с бумажным картоном заключаются в малом удельном весе, повышенной жесткости, стабильности свойств при повышенной влажности и температуре, стойкости ко многим химическим средам, в том числе к влаге, маслам, жирам, микроорганизмам и плесени, ко многим химическим реагентам. Картонопласт обладает хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, абразивостойкостью, способностью к сварке, механической обработке, способностью к нанесению печати и пр. Тара, изготовленная из картонопласта, долговечна, прочна, может использоваться многократно, транспортабельна, так как ее легко разбирать на плоские заготовки, монтируемые в коробки нужных размеров при помощи металлических скрепок.

Ячеистый (сотовый, структурированный, профилированный) лист. Жесткие профилированные листы с высокой светопрозрачностью изготавливаются из прозрачных термопластов: полиакрилатов, поликарбоната, прозрачных марок ПВХ.

Наибольшей прозрачностью обладают листы из поликарбоната и ПММА (до 87%), листы из ПВХ чаще изготавливают волнистыми с продольной или поперечной волной (по типу шифера).

Области применения: наружная реклама, отделка помещений, сельское хозяйство (строительство теплиц), коттеджное строительство, городское строительство.

Ячеистые листы — наиболее распространенный в настоящее время вид применения поликарбоната в строительной индустрии, в основном в горизонтальных или арочных перекрытиях: крышах, навесах, зенитных фонарях.

К основным достоинствам ячеистых поликарбонатных листов относятся: малый удельный вес (от 1,5 до 3,5 кг/м²), что позволяет проектировать легкие конструкции с большим количеством дизайнерских возможностей и удешевить стоимость покрытия; высокие теплоизоляционные свойства; высокая прочность на удар; высокая несущая способность (до 250 кг/м² при шаге обрешетки 1–2 м), которая сохраняется в температурном режиме от –40 до +120 °С; высокая прозрачность и химическая стойкость; долговечность (гарантированный срок службы — 10–12 лет); низкая горючесть. Применение ячеистых листов из поликарбоната экономит освещение, отопление, время монтажа, затраты на строительство, эксплуатационные затраты. Наибольшее применение ячеистый лист из ПК находит при строительстве различных городских объектов [76].

Перекрытие рынков и торговых комплексов. В свете решений городских властей по упорядочению рыночной торговли, строительству новых торговых комплексов и реконструкции действующих рынков популярность ячеистого поликарбоната в значительной степени возросла. Ячеистый ПК может помочь быстро и качественно решить проблему надежного прозрачного перекрытия этих сооружений. Как правило, это конструкции арочного типа, которые не только красивы, но и экономичны, а также достаточно просты в исполнении.

Перекрытие спортивных сооружений. В наших климатических условиях перекрытие спортивных сооружений, бассейнов и теннисных кортов вполне оправдывает себя, обеспечивая их функционирование в течение всего года. С появлением ячеистого поликарбоната изготовление таких перекрытий уже не вызывает проблем. Они долговечны, красивы и надежны.

Фонари зданий, прозрачная кровля ангаров, вертикальное остекление производственных зданий. За рубежом применение ячеистого ПК для подобных целей очень развито. Большие габариты панелей, их ударопрочность, высокие показатели тепло- и звукоизоляции, легкость материала и возможность использовать упрощенные конструкции каркаса, существенная экономия затрат на освещение и обогрев — неоспоримые факты в пользу ячеистого ПК.

Крытые автостоянки. Крытые ячеистым ПК автостоянки, имеющие единый стиль, обеспечивают защиту автомобилей и самой стоянки от дождя и снега, не требуют дополнительного освещения. Это решение привлекает простотой его реализации.

Автозаправочные станции (АЗС). Использование ячеистого поликарбоната в строительстве АЗС практикуется уже давно. Навесы и фонари, имеющие различные архитектурные решения (арочные, двухскатные и более сложной формы, выполненные в различной цветовой гамме, соответствующие стилю конкретных АЗС), неизменно привлекают внимание автомобилистов. Одновременно они могут выполнять и функцию рекламоносителя, в том числе и с внутренней подсветкой, что не только удобно и экономично в исполнении, но и великолепно выглядит, сохраняя общую согласованность всего сооружения.

Пристроенные к существующим зданиям летние кафе, административные автостоянки. Выполненные из ячеистого поликарбоната, они выглядят изящно и респектабельно. Вариации цвета панелей позволяют либо добиться максимальной освещен-

ности, либо создать эффект солнцезащиты, либо обеспечить тень, в то же время пропуская определенное количество света.

Зимние сады на плоских крышах зданий. Эти сооружения могут быть собственно зимними садами, ресторанами; их можно использовать в качестве бассейнов; они могут служить энергонакопителями; зимние сады имеются во многих странах, в частности широко распространены в Финляндии.

Аэропорты, вокзалы. Ячеистый ПК очень хорошо подходит для ограждений, функционально разделяющих различные залы. Особая «воздушность» ячеистого ПК, его звукоизоляционные свойства, возможность использования различных по светопропусканию панелей различной цветовой гаммы — все эти факторы способствуют тому, что в реконструкции зданий аэропортов ячеистому ПК отводится значительная роль.

Остановки общественного транспорта, перекрытия перронов железнодорожных станций. С появлением ячеистого ПК эти сооружения, как правило, изготавливаются именно из него, так как этот пластик удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к подобным конструкциям. Эта тенденция получила широкое распространение практически во всех городах России.

Торговые и выставочные павильоны. Козырьки и навесы из ячеистого поликарбоната независимо от их архитектурного решения смотрятся очень привлекательно, а с внутренней подсветкой часто выполняют и роль вывесок.

Балконы. Ячеистый ПК все чаще используется для вертикального остекления балконов и лоджий, так как позволяет максимально сохранять тепло в квартирах, а также более комфортно использовать эту дополнительную площадь. Верхние этажи зданий иногда не имеют защиты сверху, и навесы из ячеистого поликарбоната все чаще избавляют жителей верхних этажей от этого неудобства.

Наружная реклама. Наружная реклама в настоящее время является неотъемлемой частью городского ландшафта, и ячеистый ПК прочно занимает здесь свою нишу благодаря ударопрочности и большим габаритам, позволяющим изготавливать длинномерные вывески без стыков. Особенно актуальны стали вывески с внутренней подсветкой. Полупрозрачный опаловый ячеистый поликарбонат пользуется большой популярностью у изготовителей световых коробов.

Строительство теплиц и парников. Еще одна обширная область применения структурированного поликарбоната — аграрный сектор. Сочетание высокой прозрачности вместе с достаточно высоким светорассеиванием (исключающим ожоги растений прямыми солнечными лучами), отличной теплоизоляцией и долговечностью делает ПК-панели незаменимым материалом для изготовления крупных промышленных теплиц и парников. Хотя ПК менее чем стекло проницаем для УФ-излучения, доля проникающего сквозь него ультрафиолета достаточна для нормального развития растений. Оптимальными для такого использования являются панели толщиной 8 мм вследствие удачного сочетания цены, пропускающей способности и прочностных качеств. Ряд ведущих фирм-изготовителей предлагает панели с покрытием, которое предотвращает образование капель воды на внутренней стороне панели, а отсутствие конденсата способно заметно повысить общий уровень освещенности внутри теплицы.

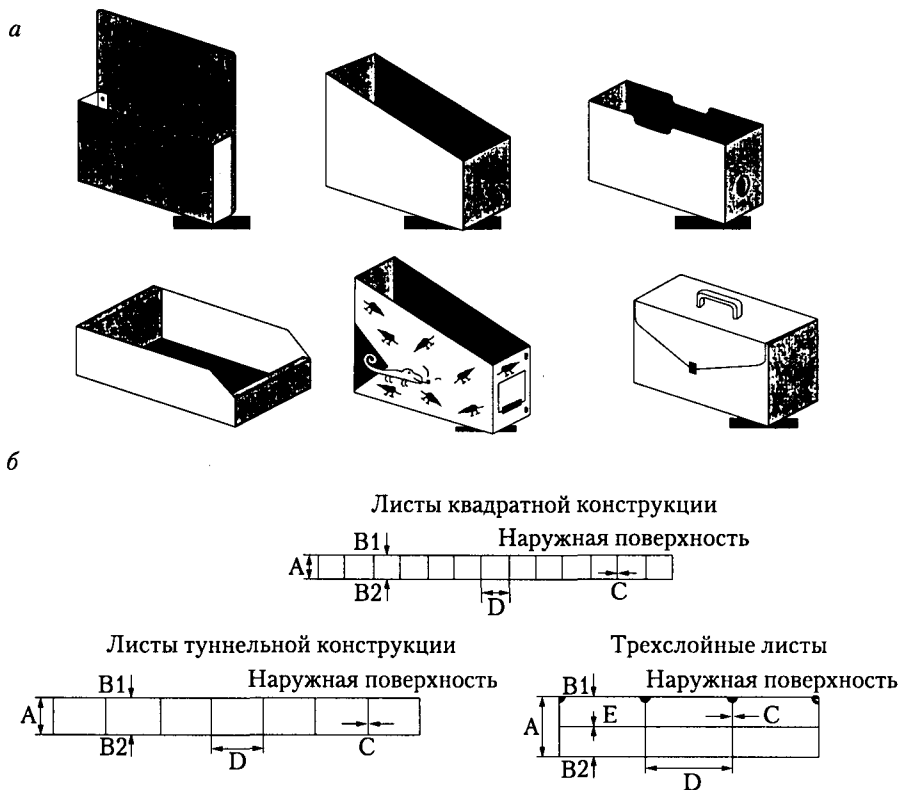


Рис. 8.18. Некоторые виды упаковочных коробок из полипропиленового «картонпласта» (а) и ячеистого листа из поликарбоната фирмы *Polygal* (б)

На рис. 8.18 показаны упаковочные коробки из полипропиленового картонопласта и некоторые виды ячеистого листа из поликарбоната.

Поликарбонат, как и любая пластмасса, подвержен температурному расширению в большей степени, чем традиционные материалы строительных конструкций. Это свойство требует особого технического решения при проектировании, особенно в плоских покрытиях больших размеров. За более чем четверть века своего развития пластмассовая индустрия выработала ряд стандартов на размеры панелей. В настоящее время выпускаются панели толщиной 4, 6, 8, 10, 16, 25 и 32 мм. Стандартизованы и горизонтальные размеры: подавляющее большинство предприятий выпускает листы шириной 2100 и длиной 6000 или 12 000 мм. Некоторые фирмы способны поставлять заказчикам листы гораздо большей длины (например, фирма *POLYGAL* осуществила поставку в Англию 36-метровых панелей). Это же касается и окраски. Помимо общепринятых в отрасли расцветок поликарбонатных панелей (прозрачная, молочная, бронзовая) в ассортименте присутствуют синий, бирюзовый, серый, зеленый и другие цвета.

Поликарбонатные ячеистые листы различных производителей отличаются поперечным сечением панелей, а также толщиной наружных поверхностей и продольных перегородок и расстоянием между ними. Для увеличения жесткости вводят в перего-

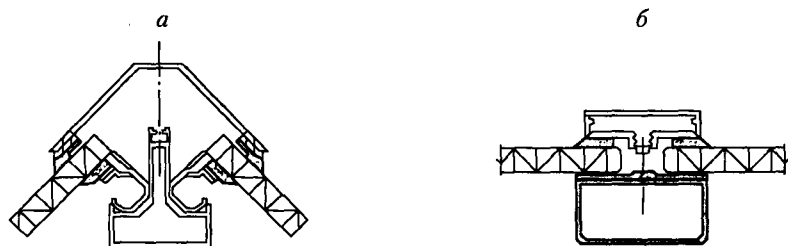


Рис. 8.19. Некоторые способы крепления сотовых панелей из поликарбоната: *а* — в наклонных крышах; *б* — в крышах павильонов

родки дополнительные диагональные (панели *DECARGLASS*) или X-образные элементы (панели *POLYGAL TITAN*), разрабатывают свои собственные системы монтажа и крепления панелей. Предприятие *POLYGAL* имеет, например, уникальную конструкцию *TRIPLE-CLIP*, представляющую собой специальную систему из алюминия, поликарбонатных ячеистых панелей и соединительных профилей, которая позволяет с минимальными трудозатратами собрать гладкую поверхность практически без стыков. Более того, применение подобной системы исключает для строителей и проектировщиков необходимость задумываться над проблемой компенсации линейного термического расширения ПК — общей проблемы практически всех термопластов. Особым образом сконструированные алюминиевые профили вместе со специальной заделкой продольных краев поликарбонатных панелей исключают возможность коробления материала при нагреве и обеспечивают полную герметичность стыков. На рис. 8.19 приведены примеры крепления сотовых панелей в конструкциях перекрытий. Имеются и другие различные системы для надежного монтажа поликарбонатных панелей.

8.4.3.3. Профили для монтажа сотового поликарбоната

Система профилей из поликарбоната для монтажа панелей ячеистого поликарбоната разрабатывается обычно производителем панелей. Профили совместимы с панелями ячеистого ПК как по цвету, так и по механическим свойствам (имеют тот же радиус изгиба, термическое расширение и т. д.). Они просты в сборке и привязываются к существующим конструкциям.

Торцевые U-образные профили предназначены для закрытия торцов панелей и декоративного обрамления панелей. Длина отрезков профиля соответствует ширине панелей.

Соединительные H-образные профили — самое простое и дешевое решение соединения панелей. Цвет и длина профиля соответствует цвету и длине панелей.

НСП-профиль — очень технологичное решение. Профиль состоит из двух частей: «базы» и защелкивающейся «крышки». Этот профиль имеет широкое применение, может использоваться как при вертикальном остеклении, так и для конструкций перекрытия. Он хорошо гнется и с успехом используется при создании арочных перекрытий. Привязка к каркасу осуществляется следующим образом: основание профиля крепится к каркасу с помощью саморезов, затем устанавливаются панели и крышка профиля, которая при надавливании «защелкивается», соединяясь с основанием. Использование этого профиля позволяет не только надежно соединить листы и за-

крепить их в конструкции, но и обеспечивает необходимый зазор для термического расширения панелей. Цвет и длина подбираются по монтируемой панели.

Монтажные алюминиевые профили при монтаже сотовых панелей обеспечивают повышенную прочность и герметичность их соединения. Алюминиевые профили укомплектовываются резиновыми уплотнителями. Данная система профилей особенно рекомендуется для создания покрытия или остекления отапливаемых помещений, поскольку полностью исключает вероятность протечек даже при самых неблагоприятных погодных условиях. Создание арочных конструкций с использованием системы алюминиевых профилей не вызывает проблем.

8.4.3.4. Оборудование для производства картонопласта и ячеистого листа

Профилированный лист может изготавливаться из любых термопластов на экструзионных установках, сочетающих особенности производства широких листов и сложных (многокамерных) профильных изделий.

В начале 1970-х гг. Япония производила профилированный лист из трех полотнищ, производимых тремя различными экструдерами [34]. Один лист гофрируется в поперечном направлении, затем листы соединяются сваркой. Такая схема производства не нашла широкого применения из-за громоздкости линии и трудности надежной сварки листов. После освоения технологии производства ячеистых листов по современной листовально-профильной технологии количество производителей оборудования для этого вида продукции стало быстро расти. На рис. 8.20 показаны схемы изготовления профилированных листов типа картонопласт и ячеистых листов из ПК, ПММА или полиэтилентерефталата (ПЭТ). Вторая схема требует более мощного экструдера с зоной дегазации расплава, более длинного пути калибрования и охлаждения листа, более мощного многороликового тянущего устройства. Резка жесткого листа высотой до 32 мм производится поперечно перемещающейся дисковой фрезой с мелким зубом или с помощью раскаленной проволоки. Сушка материала производится в бункерной сушилке в токе горячего воздуха.

Для картонопласта предусмотрена обрезка боковых кромок листа, поскольку крайние ячейки могут быть деформированы. Ширина обрезаемых кромок не превышает 20–30 мм с каждой стороны. Длина линии вместе с печью для термостабилизации не превышает 18–20 м.

Контроль размеров широких листов представляет собой определенную проблему; для ячеистого листа эта проблема еще больше, так как требуется контролировать еще и форму и размеры ячеек. В [78] предлагается система для оптического контроля за формой и размерами широких профилей сложной формы, которая может быть использована для производства профилированных листов. Система позволяет с большой точностью и скоростью измерения контролировать листы шириной до 2 м, сигнализировать об отклонениях от заданных размеров и производить быструю корректировку параметров процесса, а также протоколировать возникающие ошибки измерения и дефекты листа в целях их классификации (например, включения, воздушные пузыри, загрязнения и так далее).

8.4.3.5. Анализ течения расплава полимера в широкощелевой головке

Экструзионные головки для производства картонопласта или ячеистого листа являются широкощелевыми наподобие листовальных или для плоской пленки, но содер-

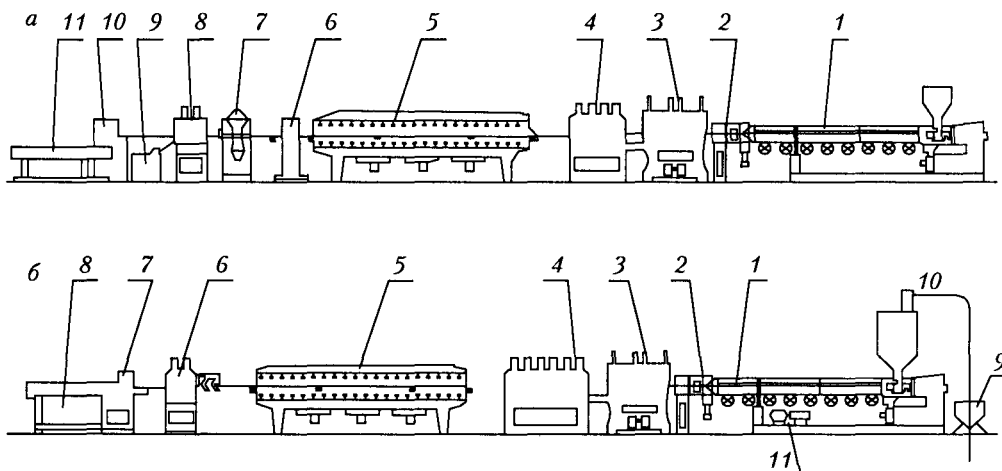


Рис. 8.20. Схемы производства картонопласта из ПЭВП, ПП (а) и сотового листа из ПК, ПММА, ПЭТ (б) [77]:

- а: 1 — экструдер; 2 — экструзионная головка с фильтром расплава; 3 — калибратор; 4 — 8-роlikовое тянущее устройство; 5 — инфракрасная печь для термостабилизации листа; 6 — устройство для снятия статического электричества; 7 — устройство для охлаждения после термостабилизации; 8 — 4-роlikовое тянущее устройство с обрезкой боковых кромок листа; 9 — намоточное устройство для кромок; 10 — режущее устройство; 11 — приемный стол;
- б: 1 — экструдер; 2 — головка с фильтром расплава; 3 — калибратор; 4 — 12-роlikовое тянущее устройство; 5 — инфракрасная печь для термостабилизации; 6 — 4-роlikовое тянущее устройство; 7 — режущее устройство; 8 — плитоукладчик; 9 — пневмозагрузчик; 10 — сушилка в токе горячего воздуха; 11 — вакуум-насос для дегазации расплава

жат также элементы оснастки для производства камерных профильных изделий. Для обеспечения равномерного выдавливания расплава по ширине и высоте формирующей щели головки необходимо подобрать одинаковые сопротивления течению для каждой элементарной струйки.

Для равномерного распределения потока расплава по ширине щели в конструкции широкощелевой экструзионной головки предусматривают специальные полости — коллекторы. Расплав в коллектор может подаваться с одного конца или через отверстие посередине его длины. В последнем случае фильеру можно рассматривать как два мундштука с половинной шириной щели, питаемые с конца и работающие параллельно.

В широкощелевой головке равномерный режим течения теоретически может быть точно определен только для конкретной рабочей точки характеристики экструдера, однако теоретические выкладки позволяют понять принципы конструирования подобных головок и разрабатывать способы их корректирования [79].

Давление на входе в формирующий канал падает по ширине коллектора от точки входа до глухого конца. Если размеры щели постоянны, это приведет к тому, что скорость экструзии и, следовательно, толщина листа будут переменными. Перепад давления по длине коллектора будет зависеть от его формы и размеров поперечного се-

чения и может быть скомпенсирован переменной длиной щели. Мундштуки, которые обеспечивают одинаковую скорость течения по всей ширине щели, называются мундштуками равного сопротивления.

Существуют различные способы расчета выравнивания сопротивления. Например, по мере удаления от места входа в головку уменьшается формирующая длина губок. Это соответствует условию постоянству расхода на единицу ширины щели, т. е. $dQ/dz = 0$ (где z — направление продольного течения). Возможно также изменение высоты формирующей щели по мере удаления от входа в головку.

При конструировании каналов широкощелевых головок учитывают следующие требования [27, 79, 80]:

- обеспечение минимальной разнотолщинности листа по ширине;
- установление постоянного расхода по ширине щели или одинакового падения давления на участке от входа в головку до выхода из нее для каждой линии тока;
- при переработке нетермостабильных материалов среднее время пребывания материала в головке не должно превышать заданной величины (например, определяемой периодом термостабильности материала);
- обеспечение одинакового среднего времени пребывания материала в головке вдоль каждой линии тока;
- сохранение минимальной скорости сдвига или напряжения сдвига;
- обеспечение максимально возможного падения давления расплава в головке.

Для расчета используется упрощенная схема цилиндрического коллектора переменного радиуса, изображенная на рис. 8.21. На практике распределительный канал выполняют более сложной формы (прямоугольной со скругленными углами для исключения застойных зон).

Падение давления в круглом коллекторе постоянного радиуса R_0 вдоль ширины щели B_1 имеет вид:

$$\Delta P = 8B_1 \bar{V}_R \bar{\eta}_R / R_0^2. \quad (8.1)$$

Поскольку радиус R в направлении течения является переменной величиной, вводят дифференциальные значения, которые для участка длиной dx можно принять постоянными:

$$\Delta P = \frac{8B_1 \bar{V}_R \bar{\eta}_R(x)}{R^2(x)} dx. \quad (8.2)$$

Интегрирование по ширине головки дает:

$$\int_{p(B_1)}^{p(x)} dp = \int_{B_1}^x \frac{8\bar{V}_R \bar{\eta}_R(x)}{R^2(x)} dx \quad (8.3)$$

или

$$\Delta p_R = 8 \int_x^{B_1} \frac{\bar{V}_R \bar{\eta}_R(x)}{R^2(x)} dx. \quad (8.3.1)$$

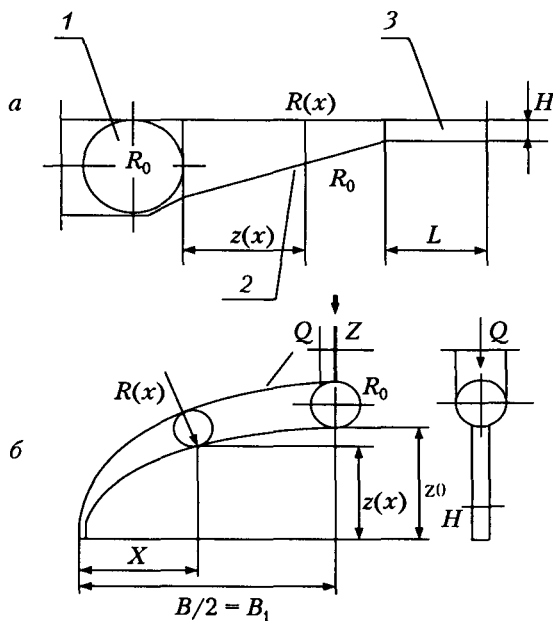


Рис. 8.21. Схема каналов широкощелевой головки:

a — продольное сечение: 1 — круглый коллектор радиуса R_0 ; 2 — вытесняющий островок; 3 — плоские губки с высотой щели H и длиной L ; общая ширина губок — B ; $R(x)$ — радиус распределительного канала на расстоянии x от оси Z ;

б — план: Q — расход расплава на входе в головку; z_0 — продольная координата в середине головки; $z(x)$ — текущая продольная координата; R_0 — радиус распределительного канала на входе; $R(x)$ — текущий радиус распределительного канала; X, Z — координаты в направлении ширины головки и по длине

Поскольку было выдвинуто требование, чтобы средняя скорость в щелевом зазоре по ширине головки имела одинаковые значения, можно принять линейное распределение объемного расхода по ширине:

$$Q(x) = Q_0 \frac{x}{B_1};$$

$$Q_0 = Q/2,$$

где Q_0 — расход в одной части симметричной головки.

Для средней скорости потока в круглом коллекторном канале:

$$\bar{V}_R = \frac{Q_0}{\pi R^2(x)} \frac{x}{B_1}.$$

Определение размеров распределительной системы. Суммарное падение давления в головке вдоль любой линии тока представляет собой сумму падений давления в круглом коллекторе и щели постоянной высоты:

$$\Delta p = \frac{8Q_0}{\pi B_1} \int_x^{B_1} \frac{x \bar{\eta}_R(x)}{R^4(x)} dx + \frac{12Q_0 \bar{\eta}_S}{B_1 H^3} z(x). \quad (8.4)$$

Условие одинакового падения давления вдоль всех линий тока по ширине щели представляется в виде

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial x} = 0. \quad (8.5)$$

Поскольку высота щели H постоянна, скорость сдвига тоже имеет постоянное значение и эффективная вязкость по длине щели не меняется: $\eta_s \neq f(x) = \text{const}$.

Контур распределительного канала представляют выражением [27, 79, 80]:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{2H^3 x \bar{\eta}_R(x)}{3\pi R^4(x) \bar{\eta}_S}.$$

Для обеспечения минимальной разнотолщинности листа вводится условие постоянной скорости сдвига в коллекторе:

$$\bar{\gamma}_R = \frac{Qx}{B_1 R^3(x)} = \text{const}. \quad (8.6)$$

Поскольку эффективная вязкость по длине губок постоянна, то получают соотношение между радиусом на входе в головку и текущим радиусом распределительного канала в зависимости от ширины головки и текущей координаты по ширине:

$$\frac{R(x)}{R_0} = \left(\frac{2x}{B} \right)^{1/3}. \quad (8.7)$$

Координаты вытесняющего островка по ширине головки определяются из выражения:

$$\frac{z(x)}{z_0} = \left(\frac{2x}{B} \right)^{2/3}. \quad (8.8)$$

Величины R_0 и z_0 связаны друг с другом следующим соотношением:

$$z_0 = \frac{\bar{\eta}_R}{\bar{\eta}_S} \frac{H^3 B^2}{4\pi R_0^4}. \quad (8.9)$$

Уравнения (8.7)–(8.9) составляют основу определения размеров распределительной системы широкощелевых головок. При расчете необходимо учитывать краевые условия.

Высота зазора островной зоны H в большинстве случаев определяется максимальными потерями давления при заданной производительности и режиме экструзии конкретного полимера.

Для определения оптимальных размеров экструзионной щелевой головки необходимо установить значения z_0 и R_0 (максимальная длина вытесняющего островка по оси коллектора на входе и радиус коллектора на входе).

Для распределительной системы принимается постоянство скорости сдвига и вязкости в любой ее точке. Только в этом случае конструкционный расчет размеров головки будет полностью независим от режима течения и изменения реологических характеристик расплава и, соответственно, универсальным. В этом случае значения z_0 и R_0 имеют вид:

$$R_0 = \left(\frac{BH^2}{\pi\sqrt{6}} \right)^{1/3}; \quad (8.10)$$

$$z_0 = \left(\frac{9\pi B^2 H}{16} \right)^{1/3}. \quad (8.11)$$

Значения R_0 и z_0 , определяемые из выражений (8.10) и (8.11), являются теоретическими, к которым следует стремиться на практике.

Подстановка выражений для расчета размеров распределительного канала и коллектора в уравнение для определения суммарного перепада давления при условии, что $\eta_R = \eta_R(x) = \eta_s = \eta$, дает:

$$\Delta p = \frac{8Q_0 \bar{\eta} B_1^{1/3}}{\pi R_0^4} \int_x^{B_1} \frac{dx}{x^{1/3}} + \frac{12Q_0 \bar{\eta} z_0}{B_1 H^3} \left(\frac{x}{B_1} \right)^{2/3}. \quad (8.12)$$

Поскольку потери давления вдоль каждой линии тока одинаковы, то для Δp на участке $x = B_1$ определяют потерю давления в зоне вытесняющего островка (в центральной зоне головки по оси z):

$$\Delta p = \frac{12Q\eta z_0}{BH^3}. \quad (8.13)$$

Из выражения (8.13) следует, что Δp не зависит от координаты x по ширине головки. Величину эффективной вязкости η рассчитывают по функции вязкости при эквивалентной скорости сдвига, которая на всех участках головки имеет одинаковое значение:

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}(\dot{\gamma});$$

$$\bar{\dot{\gamma}} = \bar{\dot{\gamma}}_s = \bar{\dot{\gamma}}_R = \frac{Q}{2R_0^3} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\pi Q}{BH^2}. \quad (8.14)$$

Кроме того, для такого инструмента должно выполняться требование одинакового времени пребывания частицы расплава вдоль линии тока, которое для произвольной линии тока определяется выражением:

$$T = \frac{\pi B}{Q} \int_x^{B_1} \frac{R^2(x)}{x} dx + \frac{BH}{Q} z(x). \quad (8.15)$$

Подстановка функций $R(x)$ и $z(x)$, интегрирование и упрощение дает выражение для времени пребывания расплава в головке, которое не зависит от x :

$$T = \frac{BHz(x)}{Q} = \frac{BHz_0}{Q}. \quad (8.16)$$

Благодаря этому условию вдоль любой линии тока расплава обеспечивается одинаковая термическая нагрузка на расплав.

Поскольку обеспечить независимость вязкости расплава от геометрии каналов не всегда возможно, применяют способы локального корректирования расхода по ширине щели. В листовальных головках для этой цели перед формирующим участком устанавливают деформируемую упругую прямоугольную планку, с помощью которой в узких пределах изменяется сечение канала и соответственно расход.

Предлагаются также и другие пути коррекции расхода по ширине, но большинство из них трудно осуществимо для практических целей.

Рассмотренная часть расчета относится в головке для изготовления сотового листа или картонопласта только к участку до дорнодержателя в соответствии с предположением, что основная часть равноскоростной экструзии определяется именно этим участком. Далее расплав обтекает спицы дорнодержателя и проникает в прорезы между дорнами, в связи с чем происходит дополнительное падение давления, которое суммируется с падением давления на распределительном участке. Для расчета суммарных падений давлений в головке используются принципы, рассмотренные в примере расчета главы 6.

С помощью программы, разработанной для электронных таблиц *Excel*, выполнен расчет формы и размеров каналов головки, предназначенной для производства сотового листа 700×8 из поликарбоната. Размеры прорезей между дорнами и пазы для проникновения расплава между дорнами корректировали в численном эксперименте, принимая в качестве критерия минимальную относительную разницу падения давления в различных точках по ширине щели.

Как уже отмечалось в главе 6, расчет с помощью электронных таблиц удобен благодаря наглядности и возможности быстрого графического представления результатов. В зависимости от скорости сдвига реологические свойства мало изменяются для ПК и довольно сильно для ПЭВП, поэтому корректировка каналов для ПК оказалась проще, чем для ПЭВП.

В заключение дадим несколько практических рекомендаций по конструкции экструзионной головки и калибратора:

1. Дорн с прорезями для формования ячеек сотового листа или картонопласта следует выполнять в виде одного жесткого блока, а не в виде отдельных небольших дорнов, притираемых по боковым смежным плоскостям. При необходимости корректировки размеров дорнов выставить их в жесткую конструкцию чрезвычайно трудно, хотя обработка каждого дорна намного легче, чем сборной конструкции.
2. Боковые щеки головки должны обеспечить надежную герметизацию и не допускать попадания расплава в воздушный коллектор. Иначе чистка громоздкой конструкции или отдельных дорнов — весьма трудоемкая задача.
3. Распределение воздуха по ширине головки должно быть равномерным, а его расход небольшим (только для недопущения свариваемости близко расположенных стенок; особенно это важно для ПЭВП и ПЭНП).
4. Калибратор для формования ячеистого листа из поликарбоната необходимо термостатировать, иначе сложно добиться гладкой и ровной поверхности.
5. Боковые стороны ячеистого листа обязательно следует калибровать даже при малой высоте листа, иначе боковые ячейки деформируются, что может отражаться на всей поверхности листа.
6. Охлаждение в калибраторе и на участке до входа в тянущее устройство должно быть достаточным, а усилие сжатия листа между валками регулируемым, чтобы предотвратить искажение поперечных перемычек. Толщина перемычек между ячейками должна быть не менее 80% от толщины наружных стенок.

8.4.4. Сайдинг

Среди новых отделочных строительных материалов самое заметное место в настоящее время занимает виниловый сайдинг [81–86]. Он появился в США в конце 1950-х гг. и предназначался для защиты стен от неблагоприятных воздействий окружающей среды (дождя, мороза, ветра).

Сайдинг — это термин, определяющий в англоговорящих странах процесс облицовки фасада или, иначе говоря, фасадные работы, т. е. виниловый сайдинг — не столько изделие или строительный материал, сколько технологию обшивки фасада виниловыми панелями.

В принципе фасад можно обшивать панелями или пластинами различной конфигурации, изготовленными из разных материалов. Наиболее распространены в настоящее время сайдинги металлические и из полимерных материалов. Первый чаще всего изготавливают из алюминия; из полимеров обычно используют поливинилхлорид (ПВХ). Термин виниловый сайдинг (*vinyl siding*) определяет панели для наружной отделки зданий из ПВХ и процесс обшивки фасада этими панелями.

Виниловый сайдинг выдерживает перепады температур от -50 до $+60$ °С, стоек к воздействию УФ-лучей, не трескается, не впитывает влагу, не гниет, не коробится, огнестоек, обеспечивает вентиляцию стен. Это экологически чистый долговечный материал, полностью соответствующий санитарно-гигиеническим требованиям.

Внешний вид таких панелей может имитировать традиционный для США отделочный материал — четырех- и пятидюймовую доску, просто деревянную плоскую поверхность, или представлять из себя панели разнообразной фактуры. Виниловый сайдинг прост в установке и не требует специальных навыков или инструментов. Любая старая постройка, отделанная сайдингом, преобразуется до неузнаваемости.

Сайдингом можно облицовывать деревянные, кирпичные, железобетонные здания, а также быстровозводимые конструкции. При правильной установке не требует ремонта в течение всего срока эксплуатации.

Сайдинг — это не только панели, но и целый набор комплектующих профилей, необходимых для закрытия торцов панелей, мест соединения в углах, наращивания панелей по длине и т. д. На рис. 8.22 показана схема дома, облицованного панелями, места установки комплектующих профилей и комплектующие сайдинги фирм *Fine Ber* (Россия) и *Wellington Square* (Канада).

В настоящее время существуют две технологии производства сайдинга — моно- и соэкструзия. При моноэкструзии профили изготавливают на линии для производства профильных изделий из традиционных композиций ПВХ. Профили можно окрашивать в массу или декорировать известными методами. Эта технология проще и дешевле. Однако сайдинг, изготовленный по этой технологии, имеет недостатки, связанные прежде всего со стойкостью к атмосферным факторам. Введение в композицию различных модификаторов для придания атмосферостойкости удорожает конечный продукт и при массовом производстве может сделать его неконкурентноспособным.

Соэкструзия сайдинга — это его формирование из двух слоев разного состава: внешнего с повышенной ударпрочностью, морозо- и светостойкостью, который обеспечивает атмосферостойкость, и внутреннего, ответственного за механические характеристики. Соэкструзия — сложная и совершенная технология, позволяющая достичь оптимального содержания дорогостоящих добавок именно там, где они будут «работать» с максимальной эффективностью.

В США существуют десятки фирм, производящие виниловый сайдинг. Свойства этого строительного материала регламентируются целым рядом американских стандартов, например, виниловый сайдинг компании *Georgia-Pacific* удовлетворяет следующим нормативным документам:

- ASTM D 3679 «Технические требования к сайдингам из НПВХ»;
- ASTM D 256 «Соппротивление ударным воздействиям пластмасс и изоляционных материалов»;
- ASTM D 635 «Горючесть пластмасс»;
- ASTM D 6358 «Прочность пластмасс»;
- ASTM D 2943 «Дымообразование пластмасс»;
- ASTM D 4226 «Соппротивление ударным воздействиям пластмасс в строительстве»;
- ASTM E 84 «Поверхностная горючесть строительных материалов»;
- ASTM D 1784-81 «Технические требования к компонентам для производства композиций поливинилхлорида (ПВХ) и хлорированного поливинилхлорида (ХПВХ)».



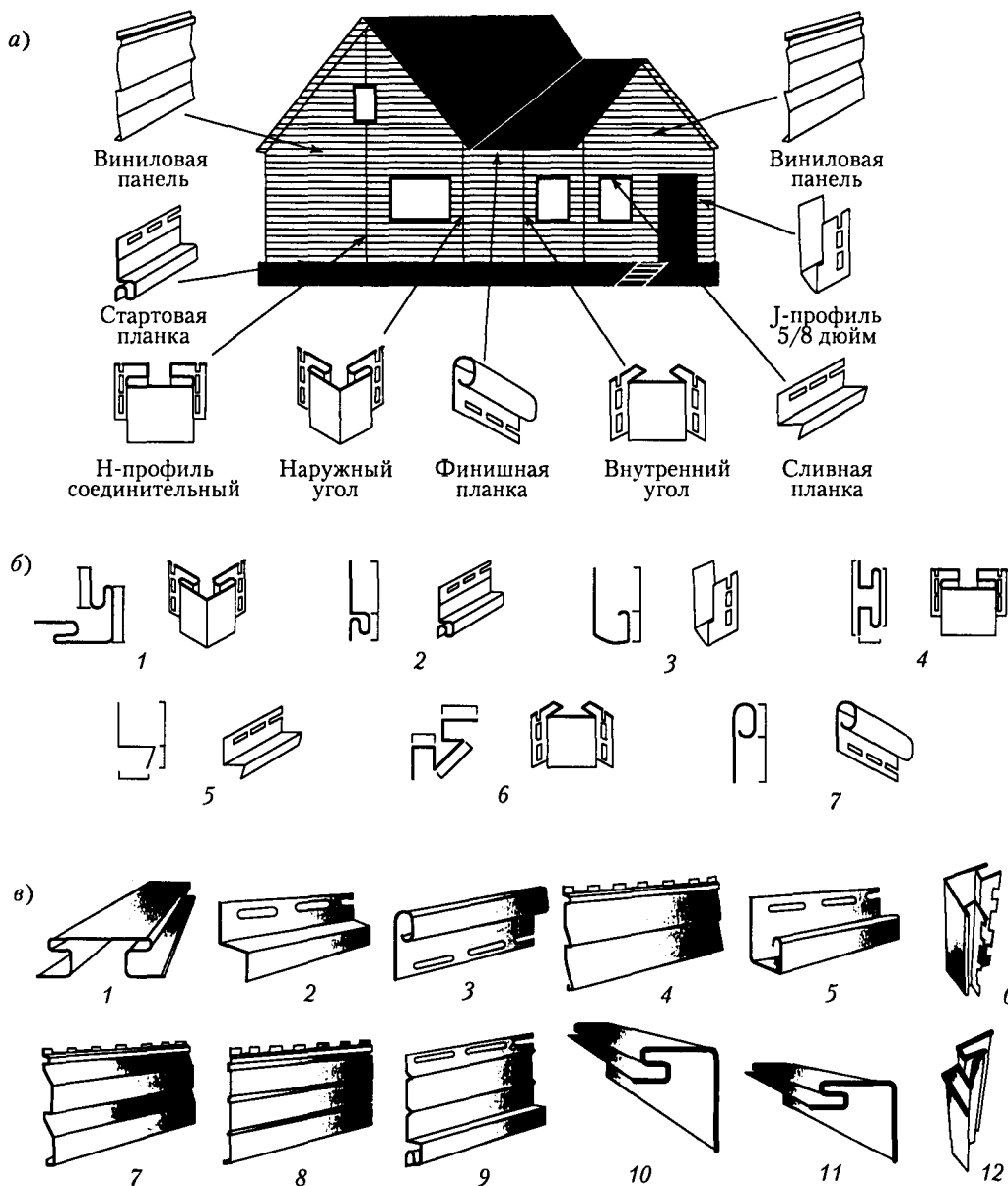


Рис. 8.22. Схема дома, облицованного панелями: а — схема установки сайдингов;

б — комплектующие профили фирмы Fine Ber [86];

1 — наружный угол; 2 — стартовая планка; 3 — J-профиль 5/8 дюйма; 4 — Н-профиль соединительный;

5 — сливная планка; 6 — внутренний угол; 7 — финишная планка;

в — сайдинги канадской фирмы Wellington Square [85];

1 — Н-профиль; 2 — водосток; 3 — финишная планка; 4 — панель с одинарным переломом; 5 —

J-профиль; 6 — угол наружный; 7 — панель с двойным переломом; 8 — софит; 9 — стартовая панель;

10 — оконная планка широкая; 11 — оконная планка узкая; 12 — угол внутренний



SINA-PLAST

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

Таблица 8.15. Свойства сайдинга компании *Georgia-Pacific*, США [84]

Параметры	<i>Georgia-Pacific</i>	Норма по <i>ASTM</i>	Стандарт <i>ASTM</i>
Прочность на разрыв, МПа	45,2	42,2	D638
Теплостойкость, °С	89	88	D648
Модуль упругости, МПа	2744	2532	D638
Коэффициент линейного термического расширения, 1/°С	$6,35 \times 10^{-5}$	—	D696
Номинальная толщина, мм	1,0	0,9	D3679
Устойчивость к кислотному воздействию (93% H ₂ SO ₄ в течение 14 сут при 54°С)	Устойчив	—	—
Скорость распространения пламени	20,0	25,0	D2843 E 84 D1929
Дымовыделение	405	—	E84 D2843

Основные контролируемые параметры профилей — сопротивление удару, изменение формы и размеров при действии повышенной температуры, деформация поверхности.

Физические характеристики сайдингов компании *Georgia Pacific* приведены в табл. 8.15.

Цветовая гамма и внешний вид сайдингов весьма разнообразны: от имитации текстуры древесины до свежеекрашенного дерева.

Цена сайдинга пока выше, чем дерева, но в долгосрочной перспективе затраты окупятся, поскольку изделия долговечны и не требуют регулярного ремонта и обновления в течение длительного времени, сохраняя свои качества и не деформируясь. Это обеспечивается, в первую очередь, качеством профилей и контролем за технологией их изготовления. В состав композиции для производства атмосферостойких профильных систем ПВХ входит повышенное содержание двуокиси титана. Необходимость использования повышенного содержания этого компонента доказана проведенными исследованиями [87]

В России в настоящее время уже немало предприятий занимается выпуском этой продукции, крупнейшими из которых являются «АльтаПрофиль» (Москва), «Терна-Полимер» (Мытищи, Московская обл.).

8.4.4.1. Оборудование и технология

Технологическая схема производства соэкструзионных сайдингов показана на рис. 8.23:

Экструзионная линия состоит из следующих компонентов:

- основной двухшнековый экструдер;
- двухшнековый соэкструдер;
- экструзионная головка со щелевой фильерой;
- устройство нанесения рисунка тиснением;



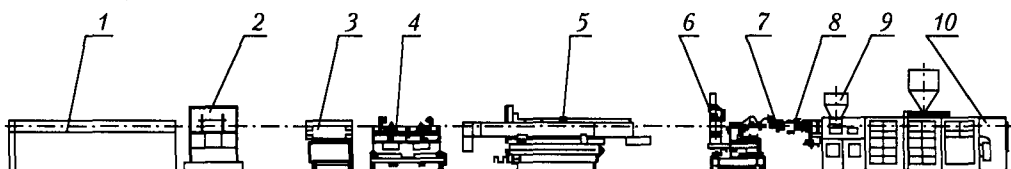


Рис. 8.23. Технологическая схема производства двухслойного сайдинга из поливинилхлорида [88]:

1 — упаковочный стол; 2 — гильотина для резки сайдинга; 3 — ленточное тянущее устройство; 4 — перфоратор; 5 — охлаждающая ванна; 6 — калибратор; 7 — устройство для тиснения поверхности; 8 — щелевая головка; 9 — соэкструдер; 10 — двухшнековый экструдер

- водяная ванна с калибраторами;
- перфоратор для нанесения перфорации, пробивки отверстий;
- ленточное тянущее устройство;
- режущее устройство с набором инструмента для различных видов профилей;
- упаковочный стол.

Формование основного сайдинга — панели производятся из широкой полосы, экструдируемой из щелевой головки шириной 250–400 мм (рис. 8.24, а). Сбоку в основную головку подается материал другого состава от соэкструдера. После этого полоса проходит через тиснильные валки, где лицевой стороне придается объемная текстура, и поступает в ванну охлаждения, на входе в которую установлено калибрующее устройство (рис. 8.24, б, в). Калибрующее устройство состоит из двух блоков, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. В первом коротком блоке предварительного формования полосе придается вид примерно соответствующий конечному изделию, но без поднутрений.

Готовые изделия поступают на склад готовой продукции, где они выдерживаются не менее суток до отгрузки потребителю. За это время профиль окончательно охлаждается и приобретает стабильные свойства.

Комплектующие профили также формуются из полосы на той же экструзионной головке или меньшей ширины (200–300 мм). При изготовлении с помощью широкой головки формуют сразу два профиля малой ширины. Разделение профилей производится дисковыми ножами, установленными за охлаждающей ванной перед поступлением в перфоратор.

Главный экструдер с параллельными шнеками диаметром 90–115 мм и длиной 26...28 D имеет более высокую производительность, чем соэкструдер. Например, некоторые машины с параллельными шнеками имеют производительность до 350–400 кг/час.

Соэкструдеры более компактны по габаритам и чаще выполняются с коническим шнеками. Обычная производительность соэкструдеров — 120–180 кг/час.

Современные экструзионные машины оснащаются мощными приводами с регулируемой скоростью вращения, микропроцессорным управлением, в некоторых случаях промышленными компьютерами.

Максимальная производительность линии по изделию может достигать 500 кг/ч и более.



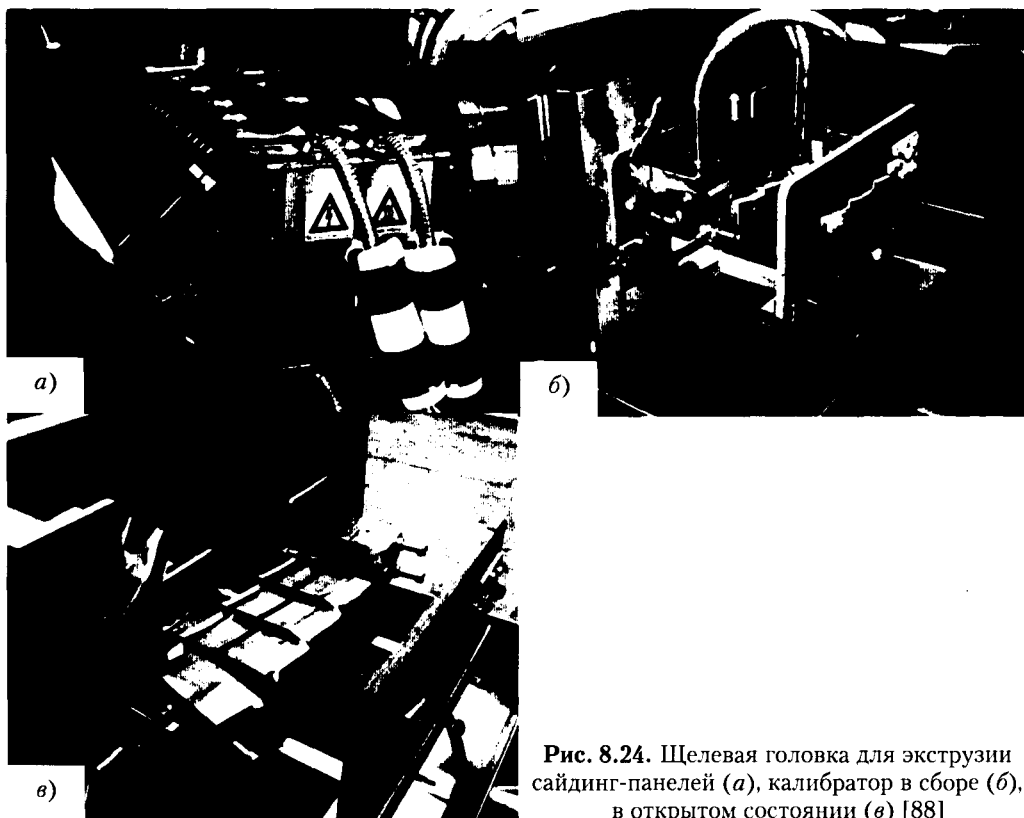


Рис. 8.24. Щелевая головка для экструзии сайдинг-панелей (а), калибратор в сборе (б), в открытом состоянии (в) [88]

Установка для тиснения поверхности. Рисунок тиснения является одной из наиболее важных визуально определяемых характеристик поверхности профилей. Для расширения видов продукции используется большое количество разнообразных рисунков тиснения, каждый из которых придает продукции уникальные свойства. Это достигается установкой соответствующих тиснильных валков, каждый из которых имеет свой рисунок.

Диаметр валков 200–400 мм, ширина — до 1000 мм. Конструкция установки обеспечивает быструю замену рабочего и прижимного роликов.

Калибрующее устройство. Одним из ключевых моментов при калибровании профилей из полосы является контролируемое охлаждение. На стадии предварительного формования нужно лишь сформировать близкую конфигурацию профиля, не допуская его переохлаждения, иначе профиль застрянет в основном блоке калибратора. Напротив, в основном блоке нужно охладить его как можно лучше, что позволит отводить профиль с большой скоростью без опасности искажения в охлаждающей ванне.

Охлаждающая ванна. Охлаждающая ванна из нержавеющей стали имеет открытое исполнение. На выходе из ванны устанавливается осушающее профиль устройство,

это может быть упрощенной конструкции калибратор, в котором профиль осушается струей сжатого воздуха или отсосом воды вакуум-насосом.

Перфоратор. Машина-перфоратор предназначена для нанесения перфорации по боковым сторонам панелей и комплектующих профилей. Перфорация необходима для крепления сайдингов и вентиляции стен здания, закрытых панелями. Форма и количество перфорируемых отверстий определяет воздухопроницаемость облицовочной панели. Основным видом вентиляционной перфорации является перфорация «рогожка» с центровыми или строеными отверстиями.

В горизонтальной облицовке должны быть предусмотрены фильтрационные отверстия для отвода конденсата с обратной стороны панели. Для выполнения этой операции используется фреза, синхронно вращающаяся с движением профиля и прокалывающая отверстия с заданным шагом.

Перфорирование отверстий под гвоздь. Устройство выреза под гвоздь имеет большое значение, поскольку именно оно определяет устойчивость облицовки, например, к воздействию ветра. Кроме того, форма и размещение выреза может упростить или усложнить работу при монтаже облицовки. Рабочий орган устройства выполнен в виде группы пуансонов и обеспечивает высокую точность совмещения направляющих и ножа, простоту обработки продукта и быструю смену направляющих выреза под гвоздь.

Перфораторы могут выполняться заблокированными с тянущим устройством или в виде отдельного агрегата с разделением операций для каждого вида отверстий.

Отрезное устройство. Отрезное устройство представляет собой машину гильотинного типа. Режущий инструмент размещается на движущейся вместе с профилем каретке, благодаря чему не происходит заклинивания профиля в процессе резки и линия не останавливается. По завершении резки инструмент возвращается в исходное положение. Привод устройства и ножа сконструирован таким образом, что возврат каретки в исходное положение осуществляется очень быстро и к началу каждого цикла резки отрезной инструмент всегда находится в одном и том же «нулевом» положении, обеспечивая высокую точность резки панелей и стабильность длины получаемых отрезков.

Упаковочный стол. На современных линиях упаковывание сайдинга в картонные коробки максимально автоматизировано. Для этого на широком столе размещаются гибочные устройства, настраиваемые под размер профилей, которые кроют, сгибают плоский картон и скрепляют его в местах стыка. Упакованные коробки с продукцией легко перемещаются по рольгангу на транспортер и удаляются из зоны упаковывания.

Технология. В условиях средней полосы и севера России можно использовать виниловый сайдинг, изготовленный только методом соэкструзии, поскольку другие технологии не позволяют выпускать панели, выдерживающие воздействие низких температур без коробления и растрескивания. Это подтверждено исследованиями причин коробления поверхности [87].

Сайдинг с торговым названием *FineBer*, производимый фирмой Терна Полимер, изготавливается по технологии американской фирмы *BIRD* на экструзионном оборудо-



Таблица 8.16. Свойства сайдинга *FineBer* на соответствие требованиям *ASTM* [86]

Параметр	Стандарт <i>ASTM</i>	Профиль <i>FineBer</i>
Прочность при растяжении, МПа	40–48	47,4
Теплостойкость по Вика, не менее, °С	70	79
Изменение линейных размеров при 70 °С в течение 1 ч, не более:		
в продольном направлении, %	3	0,45
в поперечном направлении, %	3	0,5
Прочность при ударе, при 23 °С, не менее	6,78	7,8–16,5
Атмосферостойкость (долговечность) серого сайдинга, цветовые характеристики:		
исходные:		
<i>L</i>	65–85	70,67
<i>a</i>	от –3 до 1	–1,48
<i>b</i>	от –3 до 2	–2,91
после 14 лет искусственного старения:	Нет данных	
<i>L</i>		69,73
<i>a</i>		–1,41
<i>b</i>		–2,73

довании ведущих мировых производителей и идеально соответствует климатическим условиям средней России. Сайдинг производится из ПВХ методом соэкструзии. Панель состоит из двух слоев, каждый из которых сделан из композиции определенного состава. Наружный слой, содержащий ударопрочные модификаторы и свето- и термостабилизаторы, обеспечивает стойкость сайдинга к перепадам температур, влажности, воздействию солнечных лучей; внутренний — конструкционные свойства панелей. Благодаря этому достигаются оптимальные характеристики сайдинга по прочности и долговечности. В табл. 8.16 приведены свойства сайдинга *Fine Ber* в сравнении с требованиями норм *ASTM*.

Примерный состав рецептуры для получения соэкструдированного сайдинга приведен в табл. 8.17.

Три основных фактора определяют высокое качество продукции: высококачественное сырье, современное производственное оборудование и технологическая оснастка и постоянный контроль качества.

Для производства сайдинга используется полимер и добавки от известных производителей, а тщательный контроль за процессом смешения позволяет получать максимально однородную смесь.

Контроль качества готовой продукции включает соответствие цветовому эталону; состояние и однородность поверхности; относительное удлинение при разрыве; прочность на удар; тепло- и морозостойкость.

При экструзии сайдинг-панелей и комплектующих профилей достигаются высокие скорости экструзии. В табл. 8.18 показаны примерные скорости на оборудовании фирмы *Krauss Maffei*.

Таблица 8.17. Ориентировочный состав рецептур НПВХ для производства соэкструдированных сайдингов [88]

Компоненты	Содержание, в. ч.
<i>Верхний защитный слой:</i>	
ПВХ, К = 64–68	100,0
оловоорганический стабилизатор с содержанием олова 8–10%	1,0–1,2
акриловый модификатор ударопрочности	5–7
стеарат кальция	0,8
воск (внешняя смазка)	1,2
диоксид титана	10–12
наполнитель (мел гидрофобный)	2
<i>Нижний слой:</i>	
ПВХ, К = 64–68	100,0
оловоорганический стабилизатор с содержанием олова 8–10%	1–1,2
акриловый модификатор ударопрочности	5–7
стеарат кальция	0,8
диоксид титана	2,0
наполнитель (мел гидрофобный)	6–8

Таблица 8.18. Ориентировочная производительность линии по производству сайдингов фирмы Krauss-Maffei [88]

Тип профиля	Толщина, мм	Вес, кг/м	Массовая производительность, кг/ч	Скорость экструзии, м/мин
Двойная панель	1,07	0,46	470	17,0
Двойная панель Голландка	1,02	0,44	470	17,8
Стартовая планка*	1,52	0,15	300	16,5
Сливная планка*	1,02	0,11	200	15,2
Наружный угол	1,14	0,53	300	9,5
Внутренний угол	1,14	0,325	300	15,4
5/8" J-канал*	1,14	0,15	300	16,7
Соединительный профиль	1,07	0,25	300	20,0

* Экструзия в 2 ручья.

В процессе экструзии могут возникать проблемы с оборудованием и технологией, отражающиеся на качестве продукции. В табл. 8.19 приведены наиболее типичные проблемы, возможные причины и способы их устранения.

Таблица 8.19. Проблемы при экструзии сайдингов, возможные причины и пути устранения [89]

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Оранжевая поверхность	Слишком низкая температура расплава	Увеличить температуру по зонам цилиндра или головки или шнеков
	Низкий уровень масляного теплоносителя/ непригодный теплоноситель для нужного диапазона температур	Проверить работу нагревателей Проверить и начать работу с высокотемпературным маслом
Тусклая поверхность сайдинга	Низкая температура расплава	Увеличить температуру на цилиндре/головке/шнеке. Увеличить скорость вращения шнека
Плохое качество расплава	Низкая температура расплава	Увеличить температуру на цилиндре/головке/шнеках
		Слишком холодное сырье (возможно, доставлено из холодного склада)
Глянцевые полосы	Повышенная толщина панели (двухстороннее калибрование в калибраторах)	Проверить калибратор
	Неправильно отрегулирована высота ванны	Выставить ванну
Тусклые полосы	Выпотевание паров на головке или на первом калибраторе	Проверьте состав или свойства композиции
	Посторонние частицы в калибраторе	Проверить и очистить калибратор
Царапины на поверхности панелей	Повышенное оседание паров отдельных компонентов, входящих в состав материала, на формирующем инструменте и первом калибраторе	Проверить чистоту композиции
	Посторонние частицы в головке или калибраторе	Проверить и почистить
		Отправить головку на полирование или прогнать через головку чистящий состав (только без больших комков наполнителя)
Повышенный глянец	Высокая температура расплава	Уменьшить температуру на цилиндре или головке

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Пористая поверхность	Повышенное газообразование в зоне дегазации Зона дегазации не работает нормально Высокая температура расплава Уменьшение выхода расплава из головки	Уменьшить температуру экструзии Проверить температуру воды в водокольцевом вакуум-насосе (она должна быть не выше 17 °С) Уменьшить температуру на цилиндре или головке Проверить размеры канала головки Заменить фильтр на входе в головку Проверить наличие подгаров материала в головке
Посторонний стук	Что-то застряло в одном из агрегатов комплектующего оборудования	Проверить наличие вакуума или расход воды Проверить скорость перфорации Проверить степень прижатия накаточных валков или прилипание материала к валкам Проверить состояние поверхности калибраторов Проверить, не мокрая ли панель на входе в тянущее устройство Проверить степень охлаждения панели
Повышенная кризизна панелей	Мало усилие прижатия панели в тянущем устройстве Несоосность агрегатов линии	Заменить тянущее устройство или редуктор в нем Отрегулировать положение охлаждающей ванны
Поперечный изгиб панели	Повышенное или недостаточное охлаждение воздухом или водой Неправильно выставлена высота зазора по ширине головки	Проверить прохождение экструдата через калибратор Отрегулировать охлаждение Отрегулировать равномерность выхода расплава по ширине щели, проверить расход расплава в середине и по краям щели Проверить положение всех агрегатов линии и в первую очередь блоков калибратора Отрегулировать положение блоков калибратора

Проблема	Возможная причина	Способы устранения
Скручивание панелей	Недостаточное охлаждение калибраторов Недостаточный вакуум в коллекторе	<p>Проверить положение щели между тиснильными валками относительно щели головки. Проверить показания приборов для регулирования зазора между валками</p> <p>Проверить и отрегулировать взаимное расположение блоков калибратора</p> <p>Проверить подачу воды на блоки калибраторов</p> <p>Проверить линию подачи воды на вакуум-насос, степень заливки насоса водой</p>
	Что-то застряло в калибраторах Неоптимальная температура воды в ванне Несоосное расположение агрегатов линии	<p>Освободить каналы калибратора от застрявших кусков профиля</p> <p>Проверить температуру воды в начале и в конце ванны</p> <p>Отрегулировать положение ванны</p> <p>Уменьшить уровень воды в ванне</p> <p>Обеспечить параллельность тиснильных валков</p> <p>Обеспечить соосность калибратора и ванны</p>
Плохая текстура поверхности	Мала толщина стенки панели	<p>Отрегулировать зазор между губками головки верхними или нижними регулировочными болтами</p> <p>Проверить нагрузку на двигатель, при малой нагрузке увеличить скорость вращения двигателя</p> <p>Уменьшить скорость вращения тиснильных валков или скорость отвода тянущим устройством</p> <p>Уменьшить скорость вращения шнеков экструдера (как крайнее средство)</p> <p>Проверить, правильно ли принимается панель и есть ли масло в термостате тиснильных валков</p> <p>Проверить головку и начать работу заново (как крайнее средство)</p>

8.4.5. Кабель-каналы

8.4.5.1. Кабельные системы

Кабели для подводки электричества к оборудованию на производстве, к осветительным и бытовым приборам, компьютерам и пр. в настоящее время прокладывают в металлических или пластмассовых коробах или кабель-каналах с крышкой или без нее. Прокладка проводов в кабель-каналах позволяет проводить аккуратный монтаж, проще маркировать провода в зависимости от их расположения на электрической схеме, исключить или ограничить применение скрытой проводки, иметь легкий доступ к любому проводу, создать удобное подключение различных потребительских приборов.

Существуют целые системы прокладки кабеля, которые помимо коробов включают целый набор соединительных деталей, позволяющих делать отводы от магистральной линии, встраивать розетки, выключатели, соединители и прочую электрическую арматуру. Терминология в отношении изделий для кабельных систем еще не устоялась: одни и те же изделия могут называть кабель-каналами, коробами, электротехническими коробами и т. д. В табл. 8.20 приведены некоторые кабельные системы и типы используемых кабель-каналов. Таблица содержит 2 основных столбца. В одном приведены названия из каталогов, в которых присутствует слово кабель-канал, в другом — короб.

На рис. 8.25 показаны некоторые типы кабель-каналов, а на рис. 8.26 — компоненты кабельных систем и пример кабельной системы.

Кабель-каналы из ПВХ типа ТЕК-100, показанные на рис. 8.26, а, предназначены для монтажа непосредственно на поверхности стены, либо на кронштейнах. ТЕК-100 может быть разделен на три отсека путем использования разделительных кабельных полок, позволяющих разместить в одном кабель-канале высоковольтные, низковольтные, телекоммуникационные и компьютерные провода. Такая система может использоваться как для монтажа электросистем, так и просто для прокладки кабеля. Привлекательный внешний вид кабель-каналов (белый цвет) и небольшие размеры позволяют им вписываться в любой окружающий интерьер. Розетки и соединители системы *FrontLine* типа *CAN* и *TDL* могут быть смонтированы как внутри, так и на поверхности кабель-канала. Большой перечень вспомогательных средств позволяет выйти из любой ситуации, возникшей при электромонтаже. Одинаковый дизайн всех кабель-каналов системы *FrontLine* позволяет достичь универсальности и высокой эстетической привлекательности.

Кабель-каналы большой емкости являются частью системы проводки кабелей *FrontLine* и подсоединяют силовые, компьютерные и телекоммуникационные сети к рабочим столам и участкам. Кабель-каналы системы *FrontLine Design* представляют собой систему декоративных кабель-каналов, дополняющих окружающий интерьер.

На сегодняшний день номенклатура кабель-каналов включает огромное количество позиций, различающихся как по форме, так и по размерам: кабель-каналы малых (мини- и микроканалы), средних и больших размеров, плинтусного типа, напольные, настенные, потолочные, с перегородками и без них, комбинированные, с откидывающейся крышкой и т. д.

На рис. 8.25, б показана форма мини- и микроканалов с откидывающейся крышкой испанской фирмы *Quintela* [91]. Профили белого цвета из жесткого ПВХ изготовли-

Окончание табл. 8.20

Фирма, страна	Кабель-канал	Короб	Назначение
<p><i>Rehau</i> (Австрия)</p> <p>ТОО «Остек» (Россия)</p> <p>АО «Бурый медведь» (Россия)</p>	<p>Электроканал плинтусного типа Каналы для электросети и сети отопления в жилых помещениях Мини-каналы <i>MS, MKS, MKE</i></p> <p>Кабельные каналы Мини-каналы</p>	<p>Короба для укладки электрокабеля Парапетный короб (канал) <i>signo</i> Мини-короб Короб плинтусного типа Комбинированный короб плинтусного типа Короб для укладки электропроводов Шинопроводы Кабельный короб Парапетный и плинтусный короб Короб Короб для кабеля</p>	<p>Для подводки силовых и телекоммуникационных линий</p>

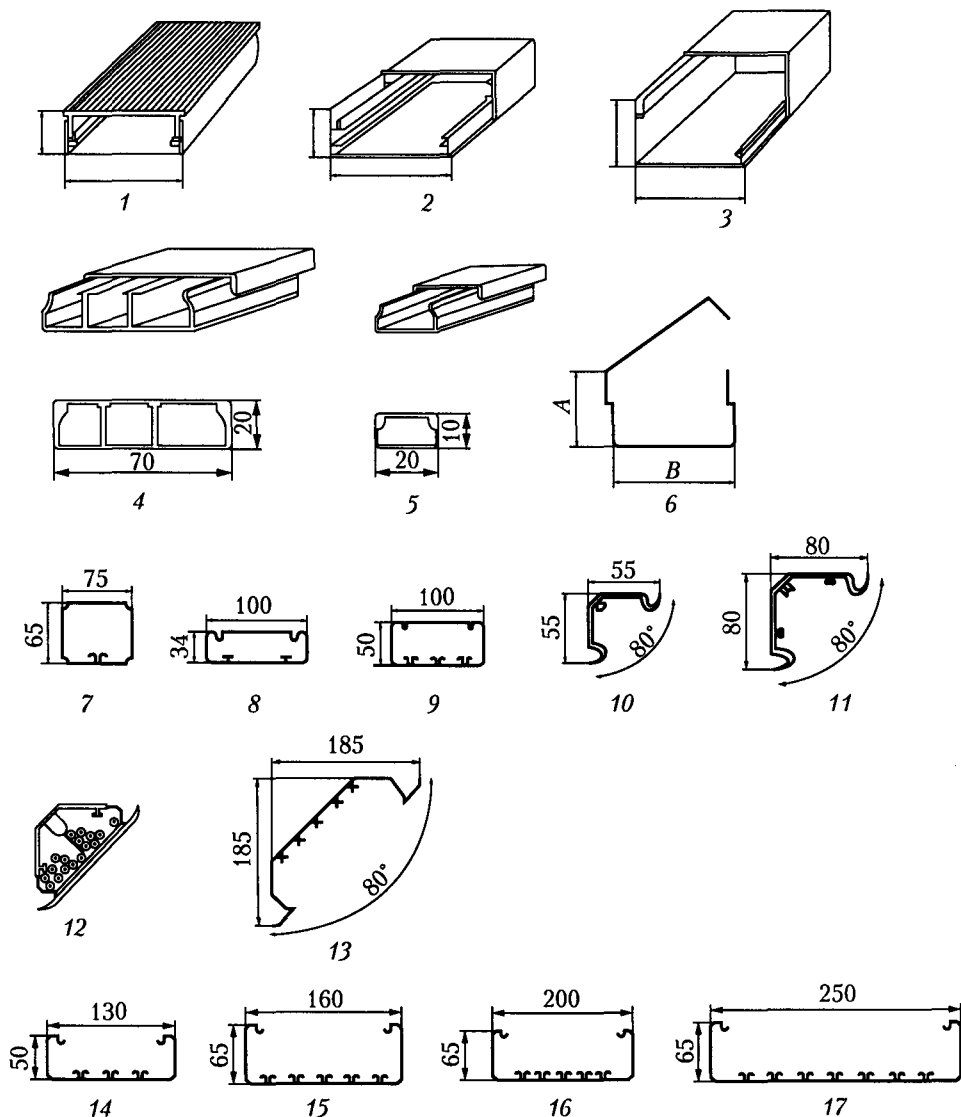


Рис. 8.25. Некоторые виды кабель-каналов [90–97]:

1–5 — кабель-каналы отечественного производства [94–95]; 6 — мини-канал с крышкой фирмы *Quintela* (Испания); 7–9 — кабель-каналы типа *DLP* фирмы *Legrand* (Франция);

10–13 — «потолочные» и вертикальные кабель-каналы *DLP 3D*, *Legrand*;

14–17 — кабель-каналы *DLP* адаптируемые, *Legrand* [92]

ваются методом экструзии как одно целое. В месте соединения крышки с корпусом (коробом) имеется тонкая перемычка, которая является шарниром для открывания крышки. Недостатком такой конструкции является недолговечность перемычки при частом открывании и закрывании крышки. С другой стороны, изготовление закрыва-

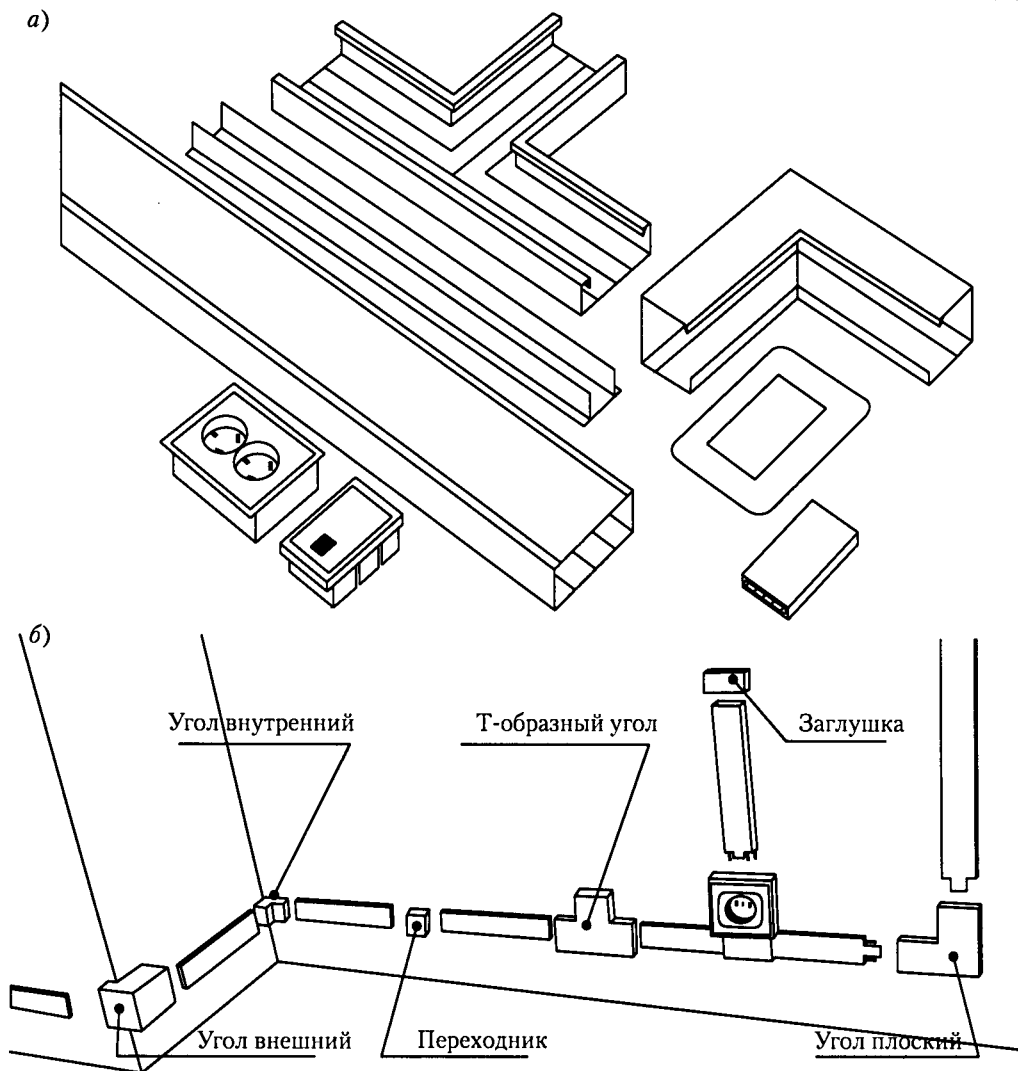


Рис. 8.26. Компоненты кабельной системы (а) и пример установки кабельной системы (б) [90]

ющего кабель-канала в одном процессе облегчает контроль формы и размеров профиля и экономит материал, хотя наладка процесса несколько более сложная, чем при раздельном изготовлении короба и крышки.

Микроканалы имеют размеры 7×12 и 10×16 , мини-каналы — 10×20 , 16×16 , 16×25 , 20×50 . Цена 1 м в розничной продаже составляет от 0,5 до 2,65 доллара.

Большой ассортимент кабель-каналов выпускает французская фирма *Legrand*. На рис. 8.25 показаны некоторые типы профилей этой фирмы [92]: настенные (7–10), потолочные (11–13) и адаптируемые к различным условиям применения (14–17).

Широкое распространение в России получили также кабель-каналы итальянской фирмы *IBOCO* и австрийской *Rehau*. Например, кабель-канал типа *ТМК* [93] имеет небольшие размеры и может сматываться в бухту для быстрой проводки силовых и слаботочных кабелей. Плнтусные кабель-каналы *ТМЛ* позволяют осуществлять сплошной поверхностный монтаж электрических средств для открытой проводки. Свойства кабель-каналов позволяют проводить монтаж при температуре от -40 до $+60$ °С. Кабель-каналы *ТМЛ* имеют габаритные размеры: 12×12 , 15×10 , 16×16 , 20×10 , 25×16 , 25×25 , $30 \times 10/2k^*$, 40×16 , 40×25 , 40×40 , 60×40 , 60×60 , 80×40 , 80×80 , 100×40 , 100×60 . Ряд типоразмеров из этой номенклатуры уже освоен отечественным предприятием «Диэлектрические кабельные системы» (ДКС, г. Тверь).

Кабель-каналы состоят из нижнего короба-основания, который крепится к стене или к полу шурупами; и крышек, которые защелкиваются на выступах короба. Короба могут изготавливаться с отверстиями под шурупы с некоторым шагом или без них.

Кабель-каналы эффективно предохраняют кабель от несанкционированного доступа и повреждения. Крышки снимаются при использовании соответствующего монтажного инструмента.

В настоящее время многие малые предприятия и средние фирмы России производят отдельные виды кабель-каналов. На рис. 8.25 (1–3) показаны кабель-каналы ООО «НК-Пласт» (Санкт-Петербург) [94], а на рис. 8.25 (4–5) — фирмы «Профиль-У», (г. Челябинск) [95].

Поскольку кабель-каналы служат для прокладки электрического кабеля, в котором возможны замыкания и возгорания, то материал для изготовления профилей должен иметь повышенную защиту от возгорания. Это свойство определяется природой самого ПВХ, а также введением специальных добавок-антипиренов, замедляющих процесс горения. При возгорании непластифицированного ПВХ выделяются хлор, углекислый газ, окись углерода, которые горение не поддерживают, и материал при вынесении из пламени гаснет. При повышенных требованиях к огнестойкости в ПВХ вводят антипирены на основе солей фосфора, сурьмы и др., которые значительно снижают скорость распространения пламени.

Профили могут выпускаться окрашенными в определенный цвет, могут состоять из двух различных материалов, свариваемых в головке при соэкструзионном процессе, иметь внешнее защитное или декоративное покрытие или окраску, иметь маркировку, наносимую непрерывно в процессе изготовления.

Для прокладки электропроводки в загородных деревянных домах популярностью пользуются окрашенные в бежевый цвет кабель-каналы малых размеров (10×20 ; 16×25 ; 25×25 и др.) [96].

8.4.5.2. Производство

Сырье. Для производства кабель-каналов используют композиции непластифицированного ПВХ. Поскольку кабель-каналы в основном используются в отапливаемых помещениях, нет необходимости добавлять в композицию повышенное количество дорогостоящих компонентов для придания изделию стойкости к атмосферным

* $30 \times 10 / 2k$ — 2-канальный кабель-канал с перегородкой.

Таблица 8.21. Характеристика сырья для производства кабель-каналов

Марка (рецептура)	ТУ, ГОСТ	Основные характеристики
«Имкомпласт-ГН» ООО «Биохимпласт» (г. Апрелевка, Московская обл.)	ТУ 2243-004-1 0641390-95	Статическая термостабильность при 180 °С — не менее 60 мин ПТР — не менее 2,0 г/10 мин Прочность при растяжении — не менее 40 МПа Прочность на удар при 23 °С для образцов с надрезом (по Шарпи) — не менее 2,0 кДж/м ² Теплостойкость по Вика — не менее 65 °С Выпускается с различной окраской, в т. ч. прозрачный Цена 1 кг (с учетом налога) — 45–50 руб.
«Сайвит», композиции МЗ, М4, ТЗ-190, ТТЗ-1 ООО «Биохимпласт»	ТУ 2243-010-1 0641390-99	Термостабильность при 190 °С для гранул — не менее 100 мин ПТР (190 °С) — не менее 1,0 г/10 мин Прочность при растяжении — 30–36 МПа для разных рецептур Теплостойкость по Вика — 70–73 °С Выпускается различных цветов: бело-кремовый, серо-белый, холодно-белый, молочно-белый Цена 1 кг — 28–35 руб.
Марки ER337, ЕН 829, ЕН 825 <i>Benvic</i> фирмы <i>Solvay</i> (Бельгия) (на свинцовых стабилизаторах)	Импорт	Плотность — 1,37–2,0 г/см ³ Теплостойкость по Вика — 66–83 °С Модуль упругости при растяжении — 2800–3200 МПа Прочность на удар (без надреза) при 23 °С — 350–700 кДж/м ² ; при 0 °С — 150–400 Прочность на удар на образцах с надрезом (по Шарпи) — 5–70 кДж/м ² Цена 1 кг — 32–35 руб.

воздействиям и к ударным нагрузкам при отрицательной температуре. Основными требованиями, учитываемыми при выборе материала для производства кабель-каналов, являются теплостойкость по Вика, прочность на удар и повышенная стойкость к распространению пламени. Последнее требование важно для прокладки силовых кабелей. Кроме того, иногда в качестве факультативного показателя указывают электрические характеристики: поверхностное сопротивление и пробивное напряжение. Обычно композиции по этим показателям не имеют проблем. Для изготовления профилей могут быть использованы серийно выпускаемые гранулированные отечественные и зарубежные марки и рецептуры НПВХ. В табл. 8.21 представлены характеристики некоторых марок НПВХ.

Таблица 8.22. Производительность оборудования при производстве кабель-каналов в один ручей

Ширина × высота профиля, мм	Периметр, мм	Масса 1 п. м, кг	Скорость экструзии, м/мин	Массовая производитель- ность, кг/ч
12 × 12	48	0,09	8	43,0
15 × 10	50	0,09	8	44,0
20 × 10	60	0,11	8	53,0
16 × 16	64	0,12	8	58,0
25 × 16	82	0,13	6	48,0
25 × 25	100	0,16	6	59,0
40 × 16	112	0,18	6	65,0
40 × 25	130	0,20	5	62,0
60 × 40	200	0,41	5	124,0
60 × 60	240	0,50	5	150,0
80 × 40	240	0,50	5	149,0
80 × 60	280	0,58	4	140,0
100 × 40	280	0,58	4	138,0
100 × 60	320	0,66	4	158,0

Оборудование и оснастка. Изготовление кабель-каналов осуществляется на типовых линиях для производства профильных изделий. Для переработки гранулированных материалов используются одношнековые экструдеры, порошкообразных — двухшнековые.

Исходными данными для выбора оборудования являются размеры, форма, масса 1 м профиля и планируемая производительность процесса.

Производительность линии по конкретному изделию ограничивает конструкция экструзионной головки и охлаждающая способность калибрующе-охлаждающих устройств. Поскольку кабель-каналы имеют толщину стенок от 0,6 до 1,5 мм, то их охлаждение при калибровании происходит достаточно быстро даже при высоких скоростях экструзии. В табл. 8.22 приведены ориентировочные скорости экструзии кабель-каналов различных размеров.

Допускается и многоручьевая экструзия в различных вариантах: два одинаковых профиля (крышка или короб), два разных профиля (крышка и короб), одновременное изготовление короба и крышки на одной линии со сборкой кабель-канала в траках тянущего устройства.

Первый вариант можно использовать при экструзии относительно небольших профилей, общая ширина которых не выходит за пределы ширины траков тянущего устройства.

Применение второго варианта требует двух независимых линий, работающих с одним экструдером, поскольку условия течения, калибрования, последующего охлаждения, отвода и резки у разных изделий могут значительно отличаться.

Непрерывная сборка короба с крышкой производится на линиях со специально установленной оснасткой, позволяющей одновременно производить заготовки короба и крышки, калибровать и охлаждать их до поступления в тянущее устройство, и замыкать сопрягаемые профили в траках тянущего устройства. Такой метод избавляет от отдельной операции по сборке и уменьшает количество непроизводительных отходов, хотя более сложен в освоении. И не каждая конструкция кабель-канала позволяет осуществлять такой способ производства.

Более подробно вопросы многоручьевой экструзии рассмотрены в разделе 8.6 данной главы.

Калибрование кабель-каналов производят в комбинированных калибрующих вакуумных калибраторах, в которых предусмотрена возможность подачи воды непосредственно на профиль снаружи или во внутреннюю часть. Это объясняется конструкцией изделий и их способностью исказить форму при неравномерном охлаждении. Подбирая условия охлаждения внутренней и наружной поверхностей профиля, добиваются минимального искажения формы при максимально возможной производительности процесса. Вопросы двухстороннего охлаждения изделий типа кабель-канал более подробно рассмотрены в главе 5.

8.5. Многоручьевая экструзия

Повышение производительности оборудования всегда остается актуальной задачей. Стремление максимально полно использовать пластикационную способность экструдера, приближая производительность линии к максимально возможной, постоянно заставляет конструкторов и технологов искать пути решения этой задачи. Одним из таких путей является применение многоручьевой экструзии, т. е. одновременное параллельное изготовление нескольких изделий сразу.

Многоручьевая экструзия позволяет получить значительно больший выход продукции почти на той же площади, что и при одноручьевой. Использование многоручьевой головки целесообразно также, когда сечение экструдировемого профиля невелико и в обычной головке могут развиваться опасные высокие давления.

Число ручьев обычно не превышает двух–четырех, так как при большем числе каналов возникают проблемы обеспечения равномерности выхода расплава по сечению, поддержание стабильности температуры в головке, равномерности отвода и охлаждения профилей.

Обычно каналы головки располагаются параллельно в горизонтальной плоскости. Каждый ручей головки может иметь либо свое собственное комплектующее оборудование (охлаждающую ванну, тянущее, отрезное и приемное устройства), либо общее. В первом случае получение изделий упрощается, поскольку каждый ручей фактически независим, и возможная неравномерность скоростей выдавливания расплава не имеет существенного значения. Однако при такой компоновке возрастают производственные площади под оборудование.

При отводе двух профилей одним и тем же тянущим устройством приходится обеспечивать одинаковые скорости выхода расплава из каждого канала. Это достигается применением дросселирующих устройств в головке, если это возможно техни-

Таблица 8.23. Сравнение затрат на производство жалюзийной планки при одноручьевой и двухручьевой экструзии [97]

Экструзионная линия	Масса профиля, г/п. м	Производительность линии		Удельные затраты, ДМ*/кг
		м/мин	кг/час	
Одноручьевая	180	3,0	32,5	2,22
Двухручьевая	360	2,5	54,0	2,06

* ДМ — западно-германские марки до введения европейской общей валюты.

чески, или с помощью изменения температуры по зонам головки каждого ручья, для чего головка должна иметь независимые тепловые зоны регулирования.

В тех случаях, когда изделие можно получать обычным путем или используя многоручьевую экструзию, бывает трудно решить, что предпочтительнее. В этом случае целесообразно сравнить экономические показатели обоих методов. В табл. 8.23 приводится сравнение показателей экструзии в один и в два ручья [97].

Приведенные данные показывают экономическое преимущество двухручьевой экструзии.

За последние годы многоручьевая экструзия получила широкое распространение, что связано как с успехами в технологии экструзии профильных изделий, так и с необходимостью более полного использования производительного оборудования. Так, в [98] рассматриваются преимущества и особенности многоручьевой экструзии с позиции состава используемого оборудования и технологических проблем процесса.

По сравнению с обычной двухручьевая экструзия имеет принципиальные отличия:

- по расположению профиля в обоих потоках (в одну сторону или зеркально относительно средней линии);
- по экструзии одинаковых или разных профилей;
- по конструкции экструзионной головки (одна общая или две одинаковых параллельных);
- по конструкции калибраторов (в зависимости от формы профилей и их расположения в головке);
- по исполнению экструдера;
- по схеме работы с одним или двумя независимыми тянущими устройствами.

8.5.1. Расположение профиля при двухручьевой экструзии

При изготовлении двух одинаковых профилей их формование и прием можно осуществлять как в одну сторону (параллельное расположение), так и располагать профили симметрично (зеркально) относительно средней линии (рис. 8.27, 8.28).

Параллельное расположение позволяет складывать отрезаемые профили в специальные кассеты для упаковки, но скорости выхода расплава из независимых фильер могут отличаться, поскольку подводящие каналы экструзионной головки трудно выполнить совершенно одинаковыми при несимметричном их расположении.

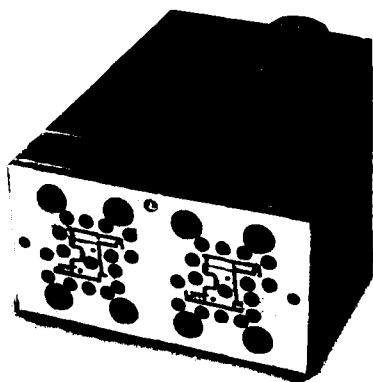


Рис. 8.27. Моноблочная экструзионная головка с одинаковым расположением формирующих отверстий относительно средней линии [98]

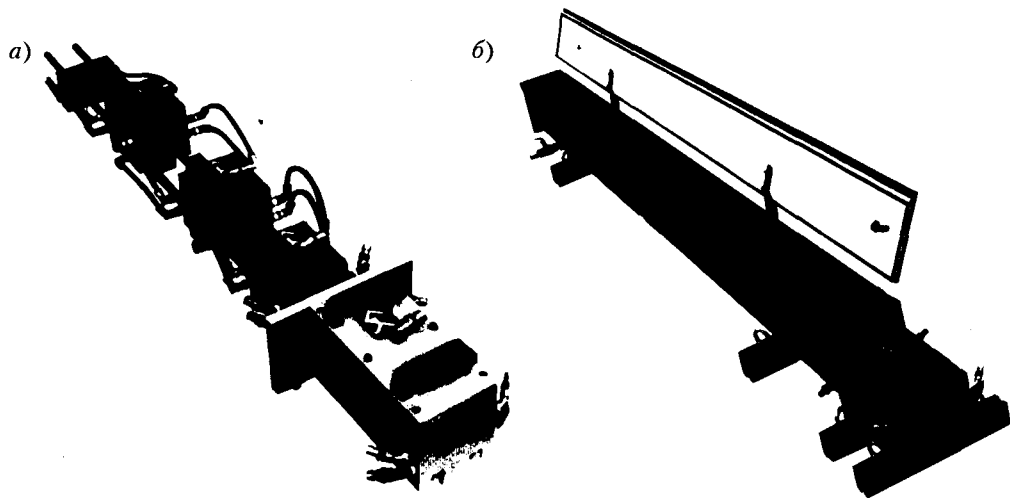


Рис. 8.28. Симметричное расположение каналов в блоках сухих калибраторов (а) и в комбинации сухого калибратора с вакуумной охлаждающей ванной (б) при двухручьевой экструзии (фирма *Gruber & Co.*, ФРГ)

Для изготовления и доводки симметричное расположение отверстий в фильере более предпочтительно, так как потоки расплава могут симметрично и равномерно распределяться по независимым каналам. Прием и упаковка профилей при изготовлении в этом случае осуществляются сложнее, чем в первом случае.

Экструзионная головка с общим адаптером и параллельными фильерами в общем компактном корпусе имеют распределительный канал, начинающийся после общего отверстия в адаптере. Она представляет собой блендовую конструкцию, состоящую из набора параллельных плит толщиной 20–30 мм, в которых имеются 2 ряда отвер-

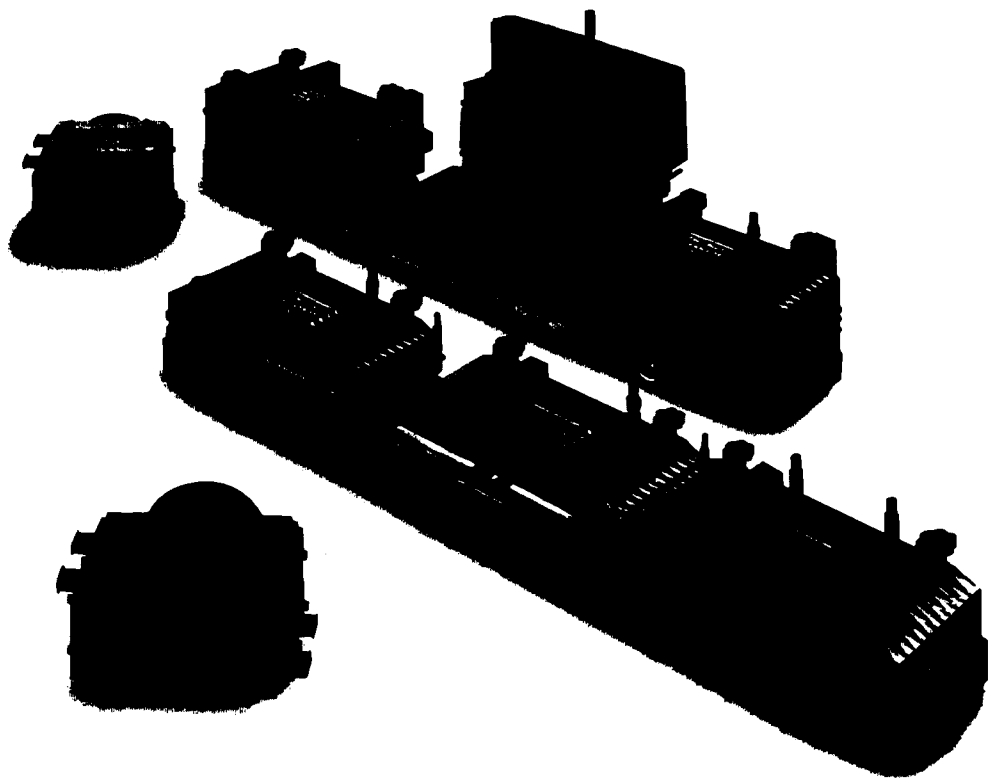


Рис. 8.29. Схема головки для одновременного изготовления кабель-канала с замыканием в тянущем устройстве (фирма *Romplast*, Италия)

ствий для прохода расплава. Преимуществом такого исполнения являются небольшие габариты и относительно небольшая масса головки. К недостаткам конструкции относится ограниченная возможность влиять на изменение течения потоков с помощью регулирования температуры.

Одной из разновидностей компактных головок в общем корпусе является головка для изготовления сопрягаемых профилей различного поперечного сечения, например, для одновременного производства короба и крышки электротехнического кабель-канала. В таких головках каналы для выхода расплава располагаются не параллельно в горизонтальной плоскости, а одно над другим. Каждая заготовка калибруется и охлаждается в своей части трехэтажного калибратора, в траках тянущего устройства профили смыкаются, образуя изделие в сборе, не требующее дальнейших операций по сборке (рис. 8.29).

Можно также применять двухручьевые головки с общим адаптером и двумя параллельными блендовыми блоками, представляющими собой отдельные экструзионные головки (рис. 8.30). С технологической точки зрения преимущества такой конструкции очевидны, поскольку она дает возможность удобного доступа к каналам со

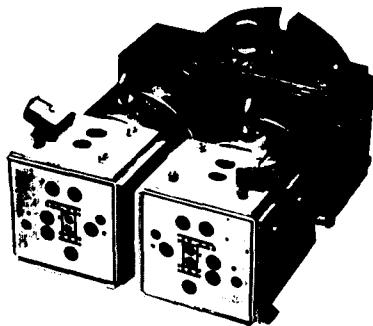


Рис. 8.30. Экструзионная головка с общим адаптером и независимыми параллельными фильерными блоками (фирма *Actual*, ФРГ)

всех сторон, что позволяет установить местные нагреватели по бокам каждого канала и в случае необходимости регулировать потоки. К недостаткам головок подобной конструкции по сравнению с моноблочными головками относят большие габариты и массу.

8.5.2. Калибрующие устройства для одно- и двухручьевой экструзии

Системы калибрования при обычной и при двухручьевой экструзии принципиально не отличаются. При изготовлении полых профилей для калибрования и охлаждения используются системы, состоящие из одного или нескольких сухих блоков, установленных на одной общей плите, и вакуумных ванн с набором калибрующих пластин, охлаждаемых либо турбулентным потоком воды, либо форсунками-распылителями.

Для других типов профилей, например, для сплошных открытых (тип 4), применяют комбинацию сухих калибраторов (один или несколько блоков на общей плите) и открытых водяных ванн. Ванны также состоят из отдельных блоков, соединяемых между собой. Общая длина ванны зависит от производительности линии для заданного профиля.

По аналогии с компоновкой экструзионных головок калибрующие устройства также могут быть выполнены в виде одного компактного блока с двумя параллельными каналами для калибрования обоих профилей (рис. 8.28) или в виде двух отдельных независимых калибраторов вместе с охлаждающими ваннами, смонтированными параллельно на станине калибровочного стола.

В блоке сухих калибраторов экструдат деформируется до конечной формы и предварительно охлаждается, приобретая с поверхности твердую корку (несущий слой). Толщина этого слоя определяет линейную скорость отвода профиля и сопротивление тяговому усилию от возникающих при калибровании сил трения.

Расплавы полимеров при охлаждении проявляют термическую усадку, которая для толстостенных изделий может достигать нескольких процентов. Для жесткого

ПВХ величина линейной усадки составляет примерно 0,5% [99]. В результате сокращения поперечных размеров может нарушаться плотный контакт еще горячего профиля с калибратором и соответственно ухудшаться охлаждение. Поэтому последовательные блоки сухих калибраторов выполняют с постепенно уменьшающимися поперечными размерами.

После блока сухих калибраторов частично охлажденный профиль поступает на окончательное охлаждение в водяную ванну. На этом этапе теплопередача от профиля к хладагенту осуществляется главным образом за счет конвективного теплообмена. Для улучшения охлаждения необходимо разрушить на поверхности профиля тонкую водяную пленку, создающую термическое сопротивление. Это достигается путем турбулизации движения жидкости вокруг профиля и повышения коэффициента теплоотдачи.

В охлаждающей ванне осуществляется контакт внешнего контура профиля или отдельных его частей с поверхностью калибрующих пластин. Для полых профилей калибрование должно осуществляться в вакуумных ваннах, где прижим профиля к поверхности пластин производится вакуумом; в открытых ваннах, в которых калибруют сплошные профили, контакт достигается путем опытного подбора размеров отверстий. Хотя пластического деформирования материала при этом не происходит, как в сухом калибраторе, контакт профиля с металлической поверхностью при ограниченной свободе перемещения способствует стабилизации его формы. В современных конструкциях охлаждающих ванн размеры отверстий во всех калибрующих пластинах принимают одинаковыми [98].

Вакуумные ванны выполняют из толстостенного органического стекла (рис. 8.28, б) или нержавеющей стали, сверху ванна закрывается откидывающейся крышкой. По контуру ванны прокладывают эластичные уплотнения, не допускающие подсоса воздуха; соединение крышки с корпусом производится замками-защелками. По торцам ванна должна иметь уплотняющие манжеты, препятствующие вытеканию воды и подсосу воздуха. Ванны должны быть оборудованы устройствами для подачи воды с одного конца и ее отсосом с другого.

Калибрующие пластины должны быть самоцентрирующимися, самостоятельно устанавливаясь в требуемое положение при движении профиля. Это возможно, когда пластины свободно вставляются в пазы корпуса ванны с некоторым зазором по длине и ширине паза.

Охлаждающие ванны и блоки сухих калибраторов выполняют как единую сменную систему для каждого типоразмера профиля, расположенную на одной плите. Это позволяет быстро проводить замену оснастки при переходе на другое изделие. При необходимости удлинить ванну ее просто наращивают стандартными блоками с помощью крепежного инструмента и уплотнительных прокладок.

8.5.2.1. «Вихревые» вакуумные ванны

При калибровании полых профилей калибрующие пластины в ванне устанавливаются таким образом, чтобы образовать замкнутые отсеки. Пластины вокруг контура профилирующего канала имеют небольшие отверстия, через которые может свободно протекать вода. Поскольку вода подается с одного конца ванны, а отсос производится с другого, происходит интенсивный ток воды в направлении движения профиля.

В каждом отсеке образуется некоторый перепад давления, поддерживающий течение воды, а пластинами создаются турбулентные завихрения. Эффект охлаждения возникает благодаря направленному турбулентному течению воды вдоль поверхности профиля. Размещая отверстия по контуру калибрующего канала в соответствии с необходимостью дифференциального охлаждения отдельных участков профиля, можно добиться его равномерного охлаждения и уменьшить термические напряжения в изделии. Преимущество такого охлаждения состоит в хорошей теплопередаче от профиля к воде при небольшом расходе воды, который по сравнению с охлаждением распылением сокращается на треть. Процесс охлаждения стабильный и легко управляется. Ванны с подобной системой охлаждения называют вихревыми. Такая система охлаждения запатентована [100, 101].

Для правильного конструирования сухих калибраторов и калибрующих пластин в настоящее время используют методы компьютерного моделирования с помощью специализированных прикладных программ (например, *PolyFlow* или программа, использованная в работе [98]). Общие положения компьютерного моделирования процесса охлаждения сложных профилей рассмотрены в главе 5.

8.6.2.2. Охлаждение с помощью распылительных форсунок

Охлаждение профиля с помощью распылительных форсунок является одним из самых старых способов интенсификации процесса. Форсунки располагаются в ванне вокруг профиля под углом, и из них факелом под давлением распыляется вода. Профиль движется через набор калибрующих пластин, а в ванне создается вакуум. Стекающая охлаждающая жидкость собирается на дне ванны и удаляется в централизованную систему.

Для эксплуатации распылительных форсунок необходим относительно большой расход воды, поскольку интенсивность охлаждения профиля ниже из-за более низкого коэффициента теплоотдачи. Разогрев жидкости в ванне может достигать 10 °С. Кроме того, форсунки-распылители могут засоряться, что нарушает стабильность производственного процесса.

8.5.2.3. Охлаждение профилей в открытой водяной ванне

Простые полые профили (например, штапики для крепления стекла), профили без дополнительных вертикальных стенок или сплошные профили открытого типа после калибрования в блоке «сухих» калибраторов охлаждаются до конечной температуры только в открытой водяной ванне. Для осушения профиля перед поступлением в траповое тянущее устройство на конце ванны устанавливают специальную калибрующую пластину с вакуумным отсосом воды или на выходе из ванны осушают профиль струей сжатого воздуха. Последний способ дороже, но проще в эксплуатации.

8.5.3. Оборудование для многоручьевой экструзии

8.5.3.1. Экструдеры

При обычной экструзии в один или два ручья используют двухшнековые экструдеры с коническими или параллельными шнеками в зависимости от размеров производимого профиля и производительности линии. При двухручьевой экструзии с высокой

производительностью применяются главным образом экструдеры с параллельными шнеками, поскольку только они могут обеспечить производительность, которую невозможно достичь на конических экструдерах из-за ограниченности их размеров.

Чаще всего используют две независимые технологические линии, работающие от одного экструдера, с головками, аналогичными приведенным на рис. 8.30, и два независимых калибратора с ваннами, аналогичными показанным на рис. 8.28, б.

Поскольку технологически комплектующее оборудование параллельных линий практически независимо (кроме работы экструдера), то на них можно изготавливать профили различной формы и размеров и с разными скоростями [98].

Преимуществом такой компоновки оборудования является возможность применения относительно простой технологической оснастки, высокая оперативность наладки и регулирования технологического процесса на каждой нитке и безопасность производства. К недостаткам можно отнести более высокую стоимость всей установки из-за необходимости приобретения высокопроизводительного экструдера больших размеров и необходимости установки крупногабаритного адаптера для присоединения независимых экструзионных головок.

8.5.3.2. Комплектующее оборудование

Экструзия в две нитки предполагает использование стандартного комплектующего оборудования линии для производства профильных изделий: калибровочный стол, траковое тянущее устройство, режущее и приемное устройства.

Калибровочный стол должен быть независимым и располагаться на отдельной раме. Независимыми также должны быть узлы подготовки воды, сжатого воздуха и вакуума.

Следует оптимизировать системы подачи воды и вакуума с точки зрения расхода, а также смену технологической оснастки, так чтобы можно было осуществить ее переустановку в кратчайшее время путем замены целых блоков, поскольку простой высокопроизводительного оборудования обходится дороже, чем изготовление нескольких одинаковых комплектов оснастки.

Тянущие устройства для двухниточной экструзии могут иметь конструкцию, отличающуюся от стандартной. Например, можно установить два независимых стандартных тянущих устройства, а можно установить устройство на общей раме с двумя параллельными траками. Здесь также возможны варианты конструкции: с одним приводом и одинаковой скоростью движения обеих лент каждого устройства; устройства с тремя лентами, в которых нижние ленты имеют одинаковую скорость движения от одного привода или представляют собой одну широкую общую ленту, а верхние узкие ленты могут независимо регулироваться по высоте. Последнее обстоятельство удобно с точки зрения наладки и регулирования процессов, что позволяет не останавливать линию целиком при нарушении процесса в одной нитке. Недостатком тянущих устройств с тремя тянущими лентами является невозможность независимого регулирования скорости вытяжки профилей в технологических нитках.

Свободны от этих недостатков тянущие устройства с четырьмя гусеничными лентами, положение по высоте и скорость которых может регулироваться независимо.

Соответственно для двухниточной экструзии необходимо подбирать и конструкцию режущих устройств. Наиболее простой вариант — режущее устройство на общей

раме с двумя режущими узлами, приводящимися в движение независимо по команде датчиков на отдельных приемных устройствах. Предпочтительно использование режущих устройств с нижним расположением режущего узла (см. схему на рис. 2.13).

В настоящее время все шире начинают применяться режущие устройства, не образующие стружки при резке: гильотины, аналогичные устройству для резки кип бумаги. Подобные режущие устройства целесообразно использовать при резке относительно тонкостенных и широких профилей, например, стеновых панелей, вагонки, сайдингов. Их также можно использовать для двухручьевой экструзии, устанавливая два независимых устройства.

С точки зрения организации производства с использованием многоручьевой экструзии на стандартном оборудовании проще всего изготовить общий адаптер к экструдеру больших размеров (при его наличии) и осуществлять независимое обслуживание технологических ниток. В каждом отдельном случае необходимо принимать во внимание все аспекты такой организации (технический, экономический, наличие площадей, технику безопасности). При выборе варианта в первую очередь следует обращать внимание на возможность получения максимально высокого качества продукции и на стабильность производственного процесса, а не на достижение максимально технически возможной высокой производительности.

8.6. Литература

8.1. Стержни

1. Экструзия толстостенных профилей и стержней. Обзорн. информ / В. П. Володин, М. А. Мирзабекова, Н. В. Жилина и др. — М., НИИТЭХИМ, 1989, 26 с. — (Сер.: Переработка пластмасс.)
2. Экструзия пластмасс. Складская программа фирмы Gehr, ФРГ: Каталог 3.000/III/88 Mz.
3. Forafilon (PVDF). Semi-finished products, produced by SIMONA. Information № 6 566.10.80.2 E
4. Halbzeuge, Fertigteile. Produktionsprogramm Pleiger, ФРГ: Каталог 5.000/10.86/Ra
5. ООО «Капролон», г. Гатчина Ленинградская обл. // <http://home.comset.net/kaprolon/PEE.htm>.
6. Titomanlio G. Исследование образования пустот в экструдированных прутках / G. Titomanlio, S. Piccarolo, G. Marrucci // Polym. Eng. and Sci. — 1985. — V. 25. — № 2. — P. 91–97.
7. Schiedrum H. O. Калибрование профильных изделий при экструзии / H. O. Schiedrum // Plastverarbeiter. — 1968. — Bd. 19. — № 8. — S. 635–640.
8. Экономичная экструзия профилей / G. Menges, E. Klein, W. Laugwitz, etc. // Plastverarbeiter. — 1987. — Bd. 38. — № 5. — S. 118–129.
9. Экструзия «Диакона». (Diakon acrylic materials extrusion): Рук-во по переработке компании ICI (Англия). — 1963, № 841.
10. The extrusion and machining of Maranyl Nylon. — Information Service Note 1105, ICI, 1962.
11. Hoechst Plastics. Hostaform: Каталог KR 104-730.
12. Gang Jing C. Математическая модель процесса охлаждения движущегося расплава термопласта / C. Gang Jing, M. Charnchi, S. J. Chen // Polymer Eng. and Sci. — 1992. — V. 32. — № 11. — P. 724–731.
13. Калинин Э. Л. Оборудование для литья пластмасс под давлением / Э. Л. Калинин, Э. И. Калинин, М. Б. Соковцева — М.: Машиностроение, 1985. — С. 16–19.

14. Басов Н. И. Литьеовое формование полимеров. / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков. — М.: Химия, 1984. — С. 206–232.
15. Bertacki J. Анализ компьютерных программ для рассмотрения процесса литья под давлением / J. Bertacki, A. Moroni // Interplastiks. — 1984. — V. 7. — P. 33–37, 40–44.
16. Menges G., Leibfried D. Анализ процесса литья с помощью прозрачной формы / G. Menges, D. Leibfried // Plastverarbeiter. — 1970. — Bd. 21. — S. 951–958.
17. Menges G. Расчет времени охлаждения изделия при экструзии с раздувом / G. Menges, M. Kulik, F. Rhiel // Plasverarbeiter. — 1973. — Bd. 24. — № 10. — S. 621–623; № 11. — S. 685–690.
18. Wolfgang D. Моделирование времени охлаждения для различных процессов переработки пластмасс / D. Wolfgang // Polym. Eng. and Sci. — 1978. — V. 18. — № 13. — P. 1030–1036.
19. Расчет времени охлаждения отливок // Plast. mod. et elastom. — 1979. — V. 31. — № 3. — P. 51.
20. Влияние экструзионной головки и комплектующего оборудования на качество экструзионных изделий / W. Michaeli, P. B. Junk, J. Wortberg, etc. // Plastverarbeiter. — 1976. — Bd. 27. — № 9. — S. 490–495; № 10. — S. 529–538.
21. Woodworth Ch. J. Компьютерное моделирование стационарного неизотермического течения расплава в трубах / Ch. J. Woodworth // Advances in Polym. Technology. — 1986. — V. 6. — № 3. — P. 251–258.
22. Mavridis H., Hrymak A. N., Vlachopoulos J. Математическое моделирование процесса заполнения формы при литье под давлением / H. Mavridis, A. N. Hrymak, J. Vlachopoulos // Advances in Polym. Technology. — 1986. — V. 6. — № 4. — P. 457–466.
23. Gogos C. G. Процесс заполнения литьевой формы, включая фонтанирующее течение при литье под давлением / C. G. Gogos, Huang Chieng-Fong // Polym. Eng. and Sci. — 1986. — V. 26. — № 20. — P. 1457–1466.
24. Itoh Kimimasa Расчет длины калибрующей насадки / Itoh Kimimasa // Jap. Plast. — 1976. — V. 10. — № 7–8. — P. 10–14.
25. Расчет процесса охлаждения / G. Menges, L. Schmidt, W. Kemper, etc. // Plasverarbeiter. — 1980. — Bd. 31. — № 3. — S. 133–136.
26. Швабауэр В. В. Исследование и разработка методов расчета процессов калибрования и охлаждения при высокоскоростной экструзии труб из термопластов: Дис. ... канд. техн. наук / В. В. Швабауэр; МИХМ. — М., 1981.
27. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations. — 2-nd Edition / W. Michaeli. — Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Gardner Publications, 1992. — 340 p.

8.2. Профили из пеноПВХ

28. Оборудование и технология экструзии жестких вспененных профилей и труб из поливинилхлорида: Обзорн. информ / В. П. Володин, Э. А. Колосс, И. В. Ситникова и др. — М.: НИИТЭХИМб 1978. — 22 с.
29. Коваль В. В. О производстве строительных вспененных ПВХ-профилей методом экструзии / В. В. Коваль // <http://www.nestor.minsk.by/sn/sn99/02/sn90616.htm>.
30. РТМ по расчету и конструированию технологической оснастки для экструзии профильных изделий из термопластов: ротапринт / НПО «Пластик». — М., 1983. — 382 с.
31. Профили из вспененного ПВХ. На сайте ООО «НК-пласт», СПб. <http://www.pvc.moulding.spb.ru>.

8.3. Комбинированные профили

32. Levy S. Созкструзия пластмассовых профилей / S. Levy // Plast. Machinery and Equipment. — 1979. — Oct. — P. 17–22.
33. Fisher W., Leuschke C., Baasch H. P. Polymer-modifizierte Celluloseacetobutyrat-Formmassen. — Kunststoffe. — 1977. — Bd. 67. — № 6. — S. 348–352.

34. Terada Jiro. Экструзия комбинированных профильных изделий / Terada Jiro // Jap. Plast. Age. — 1975. — V. 13. — № 146. — P. 39–44.
35. Фридман М. Л. Некоторые вопросы соэкструзии полимеров / М. Л. Фридман // Пластич. Массы. — 1977. — № 10. — С. 44–49.
36. Хан Чанг Дей. Реология в процессах переработки полимеров / Хан Чанг Дей; Пер. с англ. под ред. Г. В. Виноградова, М. Л. Фридмана. — М.: Химия, 1979. — 368 с.
37. Goller J., Peter H., Fischer W. Herstellung und systemgerechte Konstruktion von Celluloseacetobutyrat / Aluminium-Verbundprofilen // Kunststoffe. — 1975. — Bd. 65. — № 6. — S. 326–332.
38. Draftex Profile: Каталог фирмы Draftex GmbH, 1970.
39. Hansmann J. Polymer-Metall-Verbundprofile /J. Hansmann // Kunststoffe. — 1991. — Bd. 81. — № 11. — S. 1042–1045.

8.4. Рельефные профили

40. Hamel P. How to extrude embossed flexible profiles / P. Hamel, S.-J. Quebec // Plastics Engineering. — 1980. — V. 36. — № 6. — P. 34–36.
41. ГОСТ 30673-99. Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков.
42. Володин В. П. Экструзия профилей строительного назначения: Обзор. информ. / В. П. Володин, М. А. Мирзабекова, А. В. Шмитд. — М., НИИТЭХИМ, 1990. — (Сер. Переработка пластмасс).
43. Сайт «Оконные конструкции» <http://www.tybet.ru>.
44. Системные профили для окон и дверей: Каталог-справочник. — М., ССК-Информ, 2001.
45. Каталог «Окна. Двери» 2002 (приложение к журналу «ЕВРОСТРОЙ»).
46. Производство профилей (холдинг Proplex, г. Подольск Московской обл.). // <http://www.proplex.ru>.
47. Производители системных ПВХ-профилей в России // Окна и двери. — 2003. — № 2.
48. WEB Site ООО «Технопласт», СПб. <http://www.caurus.ru>.
49. Агентство «Нордекс» // <http://www.nordeks.ru>.
50. Швайгер М. Рентабельность экструзии оконных профилей / М. Швайгер, О. В. Юрыгин // Окна и двери. — 2001. — № 4.
51. Юрыгин О. В. Выбор экструдеров для производства пластикового оконного профиля / О. В. Юрыгин // Окна и двери. — 2000. — № 10.
52. Смутка Ф. Практические аспекты приготовления и применения рецептуры при экструзии оконного ПВХ-профиля // Ф. Смутка, О. В. Юрыгин // Окна и двери. — 2001. — № 1, 2.
53. Юрыгин О. В. Выбор рецептуры для экструзии оконного ПВХ-профиля / О. В. Юрыгин // Окна и двери. — 2000. — № 11–12.
54. Инструменты для экструзии ПВХ // Окна и двери. — 2000. — № 9.
55. Проблемы при экструзии оконных профилей, причины и способы устранения // <http://www.strictly-extrusion.com>.
56. Подоконники Moeller, Германия // <http://www.domokna.ru>.
57. Подоконники VOX, Бельгия. Web site «Комплект-Сервис»: <http://www.ks-online.ru>.
58. Подоконники РББК. Web site ООО «БАК»: <http://www.ros-expo.com>.
59. Монтаж подоконников. Web site компании «ДомОкна»: <http://www.domokna.ru>.
60. Подоконники Werzalit, Германия. Web site «Комплект-Сервис»: <http://www.ks-online.ru>.
61. Подоконники Moeller, Venta, Werzalit. Web site «Комплект-Сервис»: <http://www.ks-online.ru>.
62. Подоконники Venta, Бельгия. Web sites дилеров «РусьНовоСтрой»: www.rusnovostroy.ru, «Комплект-Сервис»: <http://www.ks-online.ru>.
63. Подоконники Rehau. // <http://www.oknashop.ru>
64. «Народный пластик» открыл собственное производство пластиковых подоконников // Окна и двери. — 2001. — № 6, 7.

65. Оконные конструкции // <http://www.tybet.ru>,
66. «Альга-профиль» — двойная премьера // Окна и дверию. — 2001. — № 1–2.
67. Стеновые панели «Профиль-У». WEB Site ООО «Профиль-У»: <http://www.profil-u.ru>.
68. WEB Site «PlastEngineering», СПб.: <http://www.plastengineering.by.ru>.
69. Инушина Л. С. «Альга-Профиль»: отделочные пластиковые материалы и изделия // Монтажные и специальные работы в строительстве. — Декабрь 2002.
70. Декоративная отделка «Альга-Профиль» — пластиковые панели // «Стройка». Ежедневная газета-приложение к справочнику «Строитель». — Июль 2002. — № 27.
71. Десеунпнк-гармония ассортимента и качества // Окна и двери. — 2000. — № 3.
72. Коваль В. В. Потребительские свойства экструдированных ПВХ панелей. Web site ООО «Технопласт», СПб.: <http://www.caurus.ru>.
73. Оборудование для декорирования профилей. // <http://www.extrusion.by>.
74. Cartonplast: Проспект фирмы Covema, Италия, 1982.
75. PP-Hohlkammerplatten fur Verpackung und Transport // Kunststoffe. — 1991. — Bd. 81. — № 12. — S. 1144.
76. Никульшина Н. Ячеистый поликарбонат помогает архитекторам решать многие проблемы города. ЗАО «Призма-Пластик». <http://www.prizma.ru>.
77. Проспект фирмы IMAG Plastec GmbH, Германия; <http://www.imagplastec.com>.
78. Оптическая измерительная и контрольная система для экструзии // Plastverarbeiter. — 1993. — 44. — № 9. — S. 162–163.
79. Wortberg J. Широкощелевая головка повышенной универсальности / J. Wortberg, K. Tempeler // Kunststoffe. — 1983. — Bd. 79. — № 8. — S. 404–406.
80. Michaeli W., Wortberg J., Menges G. Разработка основ для расчета экструзионной оснастки с учетом вязкоупругих свойств расплавов полимеров. Разработки Института по переработке пластмасс IKV. Итоговый отчет, г. Аахен, ФРГ, июль 1977. — 137 с. (ротанпринт).
81. ПВХ профили завоевывают мировой рынок. Статья из журнала «Бауштайн», 1999, № 4. Web site АО «Моспласт»: <http://www.mosplast.ru>.
82. Виниловый сайдинг. Web site компании «Арсенал-строй»: <http://www.roof-master.ru>.
83. Фасад из сайдинга: полвека без забот. // <http://www.buildinform.ru>.
84. Сайдинг. Web site компании «Западный Центр Кровли ZCK»: <http://www.ZCK.ru>.
85. Сайдинг. Web site группы компаний «Запад-Инвест»: <http://www.zapadinwest.ru>.
86. Сайдинг «FineBer». Web site фирмы Fine Ber: <http://www.fineber.ru>.
87. Summers J. W. Прогнозирование поверхностной деформации сайдингов и меры борьбы с этим / J. W. Summers, R. J. Drown // Plast. Eng. — 1979. — V. 35. — № 4. — P. 34–36.
88. Экструзия технических профилей. Доклад на семинаре фирмы Krauss-Maffei (Германия) в Москве 19 марта 2003.
89. Возможные проблемы, их причины и способы устранения при экструзии сайдингов из ПВХ // <http://www.strictly-extrusion.com/>.
90. Система Front Line фирмы Thorsman. WEB Site МБ Инфо // <http://www.mbinfo.ru/>
91. Мини- и микроканалы Quintela: Каталог электротехнических изделий // <http://220.ru>.
92. Кабель-каналы фирмы Legrand, Франция // <http://www.diamond.ru/legrand/dlp>.
93. Кабель-каналы ИВОСО: Каталог 2001 г. // <http://www.iboco.ru/>, // <http://www.dkc.ru/>
94. Кабель-каналы «НК-Пласт» WEB Site «НК-Пласт» // <http://www.pvc moulding.spb.ru/>
95. Электротехнические короба «Профиль-У» WEB Site «Профиль-У» // <http://www.profil-u.ru>
96. Кабель-каналы ТПГ Техэлектро // <http://www.texelectro.ru>

8.5. Многоручьева экстразия

97. Limbach W. Двухручьева экстразия профилей / W. Limbach. // Kunststoff-Berater. — 1971. — № 3. — S. 190–193.
98. Швайгер М. Машины и инструмент фирмы «Технопласт» для успешного производства профилей методом экстразии. Экструдеры, работающие с одним и двумя потоками: Доклад на семинаре «Технопласт — новые технологии в России» (фирма «Technoplast», Австрия), Москва, 31.янв.–01.февр.2002
99. Schiedrum H. O. Экстразия труб и профилей на двухшнековых экструдерах / H. Schiedrum // Plastverarbeiter. — 1979. — Bd. 30. — № 3. — S. 127–136.
100. Пат. EP № 0659536 B1.
101. Frank P. Apparatus for cooling plastic profiles. Technoplast Kunststofftechnik, Austria. US Pat. 5499507, 19.02.1996, US Class 62/63

ГЛАВА 9. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Внешний вид и работоспособность профильного изделия при эксплуатации зависит от его качества, определяемого формой и размерами детали, чистотой поверхности, механическими, оптическими, электрическими, теплофизическими, химическими и другими свойствами материала изделия. Если химические и в значительной мере электрические свойства определяются типом материала, из которого получен профиль, то состояние поверхности, размеры, механические характеристики (кратковременные и долговременные), оптические, теплофизические свойства зависят в значительной мере от технологических режимов изготовления изделия.

Для большинства профильных изделий показателями качества являются внешний вид и размеры, механические свойства при кратковременных испытаниях на растяжение, твердость, прочность на удар, стойкость к растрескиванию, стабильность размеров при нагреве (усадка). В специальных случаях оценивают стойкость изделия к динамическим нагрузкам (испытания на многократный изгиб и усталость), к воздействию агрессивных сред, УФ-радиации, озона (ускоренные испытания на старение, климатические испытания) и т. д.

Ниже рассматриваются наиболее типичные методы оценки качества профильных изделий.

9.1. Внешний вид. Размеры

При изготовлении профильных изделий прежде всего контролируют внешний вид профиля, а именно соответствие его формы эталону, состояние поверхности (отсутствие видимых дефектов, шероховатость, глянец, цвет) и размеры. Показатели цвета и блеска часто определяют с помощью оптических методов. Эти характеристики поддаются количественному измерению [1].

На практике для определения цвета обычно применяют цветовые атласы, в которых собрано большое количество цветных и ахроматических красок, расположенных в определенной последовательности.

В приложении к атласу даются характеристики цветности каждой краски. В красках атласов имеются отверстия, позволяющие накладывать их на поверхность, цвет которой необходимо определить.

Более точное измерение цвета можно произвести с помощью специальных приборов — колориметров, в которых используется метод сравнения цветов.

Под *блеском* материала понимают его способность направленно отражать световой поток. Наибольший блеск наблюдается при освещении идеально гладких и зеркальных поверхностей; шероховатые матовые поверхности рассеивают световой поток не направленно, а равномерно во все стороны. За меру блеска принимается доля строго направленного (зеркально отраженного) света в общем отраженном световом потоке. Сущность метода испытания на блеск заключается в измерении величины фототока, возбуждаемого в фотоприемнике под действием пучка света, отраженного от поверхности исследуемого образца. Оценку блеска количественно можно проводить с помощью фотоэлектрического блескомера типа ФБ-2.

9.1.1. Общие требования к внешнему виду профильных изделий

Форма поперечного сечения изделия должна соответствовать указанной на чертеже. Допускается незначительное отклонение формы, если это не связано с эксплуатационными характеристиками изделия или не влечет за собой ухудшения его потребительских свойств.

Состояние поверхности конкретного изделия устанавливается стандартом или техническими условиями на него. Поверхность должна быть гладкой (глянцевой или матовой в зависимости от требований), без царапин, крупных включений инородных частиц, следов разложения материала, без трещин, вмятин или углублений, ухудшающих внешний вид изделия. Допускаются незначительные продольные полосы от формующего и калибрующего инструмента или поперечные следы, вызванные вибрацией экструдера. В каждом отдельном случае внешний вид профиля должен соответствовать утвержденному и согласованному с заинтересованными сторонами стандартному образцу. Цвет изделия оговаривается в чертеже изделия. В пределах одного образца установленной длины видимое на глаз изменение цвета не допускается.

9.1.2. Размерный контроль профильных изделий

Для профилей сложной конфигурации нет необходимости контролировать все размеры, указанные на чертеже изделия. В первую очередь контролируются габаритные размеры профиля и размеры, необходимые для его нормальной эксплуатации.

В нормативной документации (ГОСТах, ТУ) с допусками на предельное отклонение формы и размеров изделия следует указывать только контролируемые параметры, остальные приводят для справки (помечаются *).

Контроль пределов отклонения формы профиля производят с помощью метода теневой проекции. Для этой цели используют различного рода проекторы с масштабом увеличения 10:1 или 20:1. В соответствующем масштабе увеличения на прозрачной кальке вычерчивается поперечное сечение изделия и допускаемое отклонение формы его сечения, с образца профиля снимается тонкий срез таким образом, чтобы не было искажения его формы. Срез помещается на стекло проекционного приспособления прибора, и на экране отображается увеличенное изображение поперечного сечения изделия. При наложении кальки чертежа на проецируемое изображение наблюдают степень отклонения отдельных элементов профиля от требуемой формы.

Изделие соответствует требованиям, если отклонение формы не выходит за пределы допускаемого отклонения.

Этот метод трудоемок и не всегда дает верные результаты, поскольку сделать тонкий срез с поперечного сечения профиля без искажений весьма не просто. При большей толщине среза возникают погрешности измерения, связанные с перпендикулярностью торцов среза, поэтому данный метод редко применяется в заводской практике и только для изделий, для которых можно получить тонкий недеформированный срез.

Более надежный контроль формы производится с помощью шаблонов или сопрягаемых деталей, с которыми должен работать испытываемый профиль.

При серийном изготовлении продукции основные контролируемые размеры изделия периодически проверяются непосредственно оператором экструзионной машины с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,1–0,05 мм, хотя, строго говоря, контактные методы измерения применяются только для жестких пластмасс [1]. Для эластичных («мягких») полимеров, по мере возможности, следует использовать бесконтактные методы измерения (например, оптические, ультразвуковые и пр.).

9.1.2.1. Измерительные средства

Универсальные измерительные средства. Для контроля габаритных размеров деталей из пластмасс с допусками, превышающими 0,6 мм для наружных размеров и 1,2 мм — для внутренних, следует применять штангенинструмент: штангенциркули (ГОСТ 166-89); штангенглубиномеры (ГОСТ 162-80); штангенрейсмусы (ГОСТ 164-80). Для контроля размеров плоских поверхностей недеформируемых деталей при допусках на проверяемые размеры, превышающих 0,06 мм, необходимо применять микрометрический инструмент: микрометры (ГОСТ 6507-78); нутромеры микрометрические (ГОСТ 10-78); глубиномеры микрометрические (ГОСТ 7470-78). При проверке размеров деталей с допусками на контролируемые размеры, превышающими 0,06 мм, целесообразно пользоваться индикаторами, рычажно-зубчатыми приборами; индикаторами часового типа (ГОСТ 577-68); индикаторными скобами (ГОСТ 11098-75); индикаторными нутромерами (ГОСТ 868-82); рычажнозубчатыми индикаторами (ГОСТ 5584-75) [2].

Оптико-механические измерительные приборы следует применять в случаях, когда измерительное усилие вызывает значительную деформацию детали и когда применение других измерительных средств малоэффективно (измерение малых пазов, отверстий и др.). Инструментальные микроскопы (ГОСТ 8074-82), окулярные винтовые микрометры (ГОСТ 7865-80), вертикальные длиномеры (катетометры), проекторы целесообразно использовать при допусках на контролируемые размеры, превышающих 0,04 мм. При использовании этих приборов необходимо учитывать следующее:

- 1) если измеряются размеры деталей черного цвета, то при совмещении черной визирной линии с измеряемыми элементами изделия возможна субъективная ошибка, так как визирная линия сливается с фоном детали;
- 2) при измерении размеров изделий с глянцевой поверхностью возможны субъективные ошибки, вызванные бликами от неправильного освещения поверхности детали или тенью от выступов, ребер и пр.; наиболее часто эти ошибки воз-

никают при совмещении визирной линии с элементами детали, расположенными в ее полостях, внутри профилей коробчатого типа, а также с радиусными участками поверхности изделия.

Специальные измерительные средства. Для измерения толщины мягких листовых и пленочных материалов, а также высоты или длины детали, следует применять толщиномеры ТР-10, ТИР-1, ДМТИ-150. Толщиномеры имеют большую площадь измерительной поверхности по сравнению с универсальными измерительными средствами, что уменьшает контактные деформации в процессе измерений.

При проверке толщины стенок полых профилей возможно применение различного рода стенкомеров. Контроль угловых размеров изделий из пластмасс производят индикаторными угломерами.

9.1.2.2. Методы контроля размеров профильных изделий

Контроль гладких линейных размеров. Контроль высоты, ширины, толщины стенок профиля может осуществляться с помощью индикаторной стойки, микрометра, гуськовых скоб, штангенциркуля, инструментального микроскопа, микрометрического высотомера, но чаще всего применяют индикаторную стойку (рис. 9.1). В качестве измерительной головки используют индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Микрометр целесообразно применять для контроля размеров недеформируемых деталей. Штангенциркуль применяется, когда требования к точности размеров относительно невысоки. С помощью инструментального микроскопа контролируют высоту деталей, при контроле которых обычными методами могут возникать значительные деформации, вносящие большую погрешность в измерение.

Схема измерения поперечной кривизны профиля («арочность») производится с помощью приспособления, показанного на рис. 9.2.

Контроль угловых размеров. Углы между плоскостями рекомендуется измерять угломерами, имеющими пределы измерения 0–90° (с угольником) и 90–180° (без угольника).

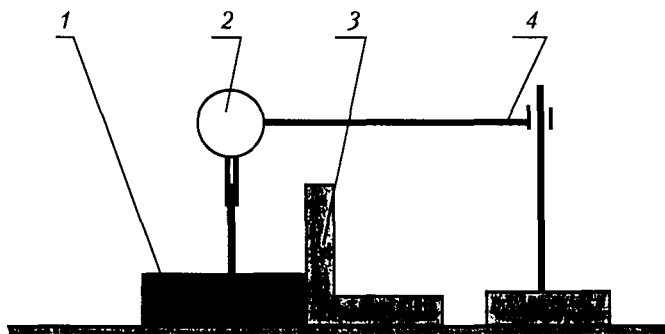


Рис. 9.1. Контроль высоты профиля с помощью индикаторной стойки:
1 — измеряемая деталь; 2 — индикатор часового типа; 3 — установочный угольник;
4 — индикаторная стойка

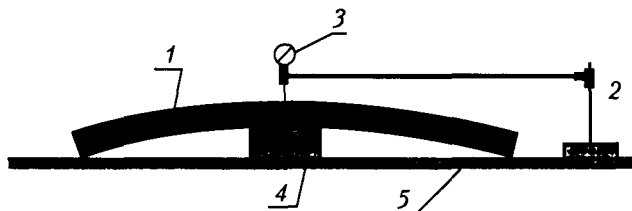


Рис. 9.2. Схема измерения стрелы прогиба изогнутого профиля:

1 — профиль; 2 — индикаторная стойка; 3 — индикатор; 4 — щуп (концевая плитка); 5 — опорная плита

Контроль неплоскостности плоских поверхностей (стрела прогиба). Этот метод контроля принципиально не отличается от метода измерения поперечного изгиба (арочности). Он применяется при малых отклонениях формы для жестких пластмасс, для которых важно точное ее соблюдение. Стрела прогиба изогнутого на длине 1 м профиля определяется набором мерных щупов, набором концевых мер длины или с помощью индикаторного приспособления.

При контроле стрелы прогиба с помощью щупов или концевых мер длины (рис. 9.2) изделие устанавливают на ровную горизонтальную поверхность, например, поверочную плиту, слегка прижимая ее к этой поверхности. Между опорной поверхностью и изделием поочередно вводят щупы или концевые плитки до полного заполнения зазора между ними. За величину стрелы прогиба принимают величину такого щупа, который входит в зазор, не отрывая детали от плиты.

Контроль скручивания профиля. В некоторых случаях необходимо контролировать угол скручивания изделия на некоторой заданной длине. Угол скручивания можно определить с помощью угломеров. Для этого один конец детали устанавливается и закрепляется на ровной поверхности, а ко второму к горизонтальной грани прикладывают угольник угломера и измеряют угол поворота [3, 4] (рис. 9.3).

Контроль продольной кривизны («сабельности»). В результате неравномерного охлаждения элементов профиля происходит неравномерная усадка его слоев и как следствие возникает сабельность изделия, т. е. отклонение от прямолинейности. Обычно отклонение от прямолинейности измеряют на рабочей длине детали или на длине в 1 м. Для этого изделие прикладывают к ровной поверхности, один конец профиля закрепляется [3, 4]. В зависимости от требуемой точности штангенциркулем, инди-

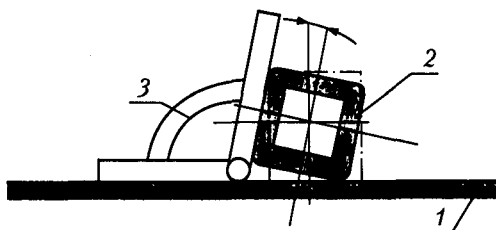


Рис. 9.3. Схема определения угла закручивания профиля:

1 — опорная плита; 2 — измеряемая деталь; 3 — угломер

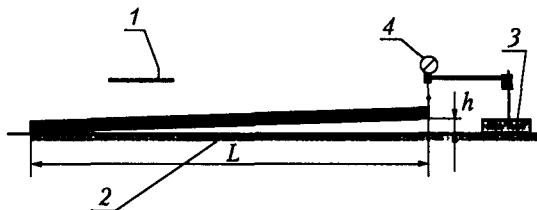


Рис. 9.4. Схема измерения сабельности профиля:

1 — измеряемая деталь; 2 — опорная поверхность; 3 — индикаторная стойка; 4 — индикатор

каторным приспособлением или каким-либо другим способом измеряют отклонение второго конца изделия от опорной поверхности (рис. 9.4).

9.2. Кратковременные механические испытания

К механическим испытаниям относятся кратковременные испытания на прочность при различных видах нагружения: растяжении, сжатии, изгибе, кручении, срезе, кратковременные и долговременные испытания на деформируемость (твёрдость, упругость, релаксацию напряжений и деформаций, ползучесть), динамические испытания на удар, испытания на многократный изгиб и т. д. Необходимость проведения соответствующих испытаний определяется назначением и областью применения изделия, условиями его работы и типом материала изделия. Чем точнее методы испытания моделируют режимы эксплуатации детали, тем надежнее оценка качества изделия.

Прочность, деформация и модуль упругости при растяжении ISO R527 (DIN 53455, DIN 53457, ASTM D638M) [5]. Основой для понимания свойств материала являются сведения о том, как материал реагирует на любую нагрузку. Зная величину деформации, создаваемой данной нагрузкой (напряжением), конструктор может предсказать реакцию конкретного изделия на его рабочие условия. Зависимости между напряжениями и деформациями при растяжении являются наиболее часто применяемыми характеристиками механических свойств для сравнения материалов или конструирования конкретных изделий.

В зависимости от определяемой характеристики материала скорости при испытаниях устанавливают в соответствии с рекомендациями стандартов:

скорость А — 1 мм/мин — определение модуля упругости при растяжении;

скорость В — 5 мм/мин — диаграмма напряжений при растяжении для ПМ со стекловолоконным наполнителем;

скорость С — 50 мм/мин — диаграмма напряжений при растяжении для ПМ без наполнителя.

Для испытания на растяжение используют универсальный образец, форма которого показана на рис. 9.5.

В зависимости от типа пластмассы скорости растяжения по ГОСТу 11262 могут отличаться. Их значения представлены в табл. 9.1.

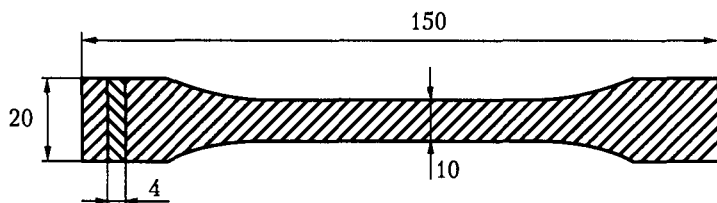


Рис. 9.5. Универсальный образец для испытаний ISO R527

Таблица 9.1. Скорости растяжения стандартных образцов при испытании пластмасс на растяжение по ГОСТу 11262-76 [6]

Материал	Тип образца	Скорость растяжения, мм/мин
Полиэтилен высокой плотности	1	100
Полиэтилен низкой плотности	1	500
Полипропилен	1	100
ПВХ жесткий (непластифицированный)	2	50
ПВХ пластифицированный	1	100
Полистирол общего назначения	2	50
Полистирол ударопрочный	2	100, 50
АБС	2	50 (100)
Полиамиды	2	50 (100)
Полиакрилаты	2	50
Полиацетали	2	50
Эфиروцеллюлозные пластики	2	50

Примечание. В скобках указаны допускаемые скорости растяжения.

Образец растягивают с постоянной скоростью и регистрируют приложенную нагрузку и удлинение. После этого вычисляют напряжения и деформации:

напряжение = нагрузка/единица площади исходного поперечного сечения, МПа;

деформация = (удлинение/исходная длина) × 100%.

Другими механическими свойствами, определяемыми по зависимости напряжения деформации, являются:

модуль высокоэластичности (упругости) = напряжение/деформация, МПа;

предел текучести — максимальное напряжение в начале пластического течения материала, МПа;

предел прочности — напряжение при разрушении, МПа;

деформация при разрыве — деформация при разрушении или максимальное. относительное удлинение, %;

предел пропорциональности — точка начала нелинейности на диаграмме растяжения;

модуль упругости — модуль ниже предела пропорциональности, МПа.

На рис. 9.6 показаны типичные диаграммы растяжения пластмасс.



Рис. 9.6. Диаграмма растяжения пластмасс [5]

Прочность и модуль упругости при изгибе ISO 178 (DIN 53452, ASTM D790). Прочность на изгиб является мерой сопротивления материала изгибу или «жесткости материала» (рис. 9.7).

Модуль упругости при изгибе (отношение напряжения к деформации) наиболее часто упоминают при ссылке на упругие свойства. Модуль упругости при изгибе эквивалентен наклону линии, касательной к кривой напряжения/деформации, в той части этой кривой, где пластик еще не деформировался.

Значения напряжений и модуля упругости при изгибе измеряются в МПа.

Определение твердости. Под твердостью понимают способность тела противостоять внедрению в поверхностные слои инородных тел. Эта способность зависит от свойств материала и от формы и свойств контртела. Существует несколько методов определения твердости материалов, отличающихся формой индентора и методикой проведения испытания.

Сравнение твердостей по Бринеллю, Роквеллу и Шору. Испытание по Роквеллу оценивает твердость пластмасс после упругого восстановления деформации образца. В этом заключается отличие этого метода от испытаний на твердость по Бринеллю и

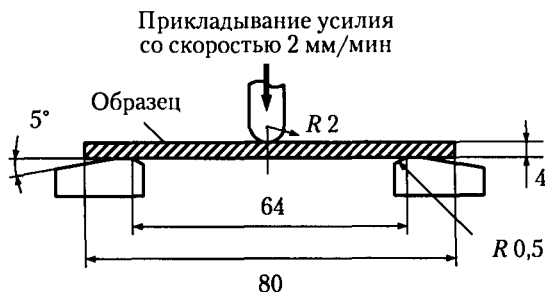


Рис. 9.7. Испытания на изгиб

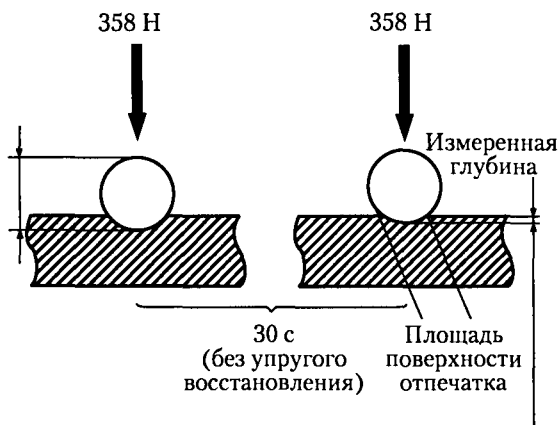


Рис. 9.8. Испытание твердости по Бринеллю

Шору, при которых твердость определяют по глубине проникновения индентора при действии нагрузки и, следовательно, исключают любое упругое восстановление деформации материала. Поэтому значения по Роквеллу не могут быть непосредственно соотнесены со значениями твердости по Бринеллю или Шору [5,6].

Твердость по Бринеллю ISO 2039-1 (DIN 53456). Полированный закаленный стальной шарик диаметром 5 мм вдавливают в поверхность испытуемого образца (толщиной не менее 4 мм) с усилием 358 Н. Через 30 с после приложения нагрузки измеряют глубину отпечатка. Твердость по Бринеллю $H_{\text{Бр}} 358/30$ рассчитывается как «приложенная нагрузка», деленная на «площадь поверхности отпечатка». Результат выражают в Н/мм^2 (рис. 9.8).

Твердость по Роквеллу ISO 2039-2. Число твердости по Роквеллу непосредственно относится к твердости материала в месте отпечатка на пластмассовом образце: чем выше это число, тем тверже материал. Вследствие небольшого перекрытия шкал твердостей по Роквеллу для одного и того же материала можно получить два разных числа по двум разным шкалам, причем оба эти числа могут быть технически правильными. Число твердости по Роквеллу вычисляется как $H_R = 130 - h/0,002$, где h — глубина отпечатка после снятия основной нагрузки в мм (рис. 9.9) [5, 6].

Индентор, представляющий собой полированный закаленный стальной шарик, вдавливают в поверхность испытуемого образца. Диаметр шарика зависит от применяемой шкалы Роквелла. Сначала образец нагружают малой нагрузкой, затем основной, после чего снова той же малой нагрузкой. Фактическое измерение основано на общей глубине проникновения, которая вычисляется как общая глубина после снятия основной нагрузки минус упругое восстановление после снятия основной нагрузки и минус глубина проникновения при малой нагрузке. Число твердости по Роквеллу вычисляется: 130 минус глубина внедрения с шагом 0,002 мм.

Числа твердости по Роквеллу должны находиться в пределах от 50 до 115. Значения, выходящие за эти пределы, считаются неточными: измерение необходимо повторить еще раз, используя следующую более жесткую шкалу. В табл. 9.2 приведены

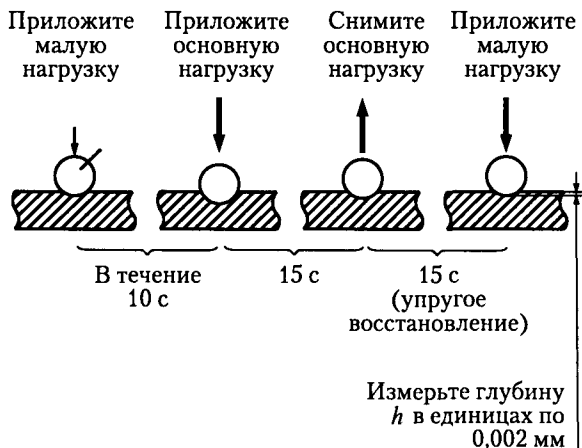


Рис. 9.9. Определение твердости по Роквеллу [5]

Таблица 9.2. Испытание твердости по Роквеллу

Шкала твердости	Малая нагрузка, Н	Основная нагрузка, Н	Диаметр шарика индентора Роквелла, мм
<i>R</i>	98,07	588,4	12,7
<i>L</i>	98,07	588,4	6,35
<i>M</i>	98,07	980,7	6,35

шкалы твердости, нагрузки и размеры индентора. С увеличением твердости материала шкала изменяется от *R* до *M*.

Если для более мягкого материала требуется менее жесткая шкала, чем шкала *R*, то определение твердости по Роквеллу не подходит. Тогда можно использовать метод определения твердости по Шору (ISO 868), который применяется для низкомолекулярных материалов.

Твердость по Шору ISO 868 (DIN 53505, ASTM D2240). Значениями твердости по Шору являются показания шкалы, полученные в результате проникновения в мягкий образец стального стержня. Эта твердость определяется склероскопами двух типов, оба из которых имеют калиброванные пружины для приложения нагрузки к индентору. Склероскоп *A* применяется для более мягких материалов, а склероскоп *D* — для более твердых (рис. 9.10).

Значения твердостей по шкалам Шора могут принимать значения:

- от 10 до 90 для склероскопа Шора типа *A* — мягкие материалы,
- от 20 до 90 для склероскопа Шора типа *D* — твердые материалы.

Если измеренные значения $> 90A$, то материал слишком тверд, и должен применяться склероскоп *D*. Если измеренные значения $< 20D$, то материал слишком мягок, и должен применяться склероскоп *A*.

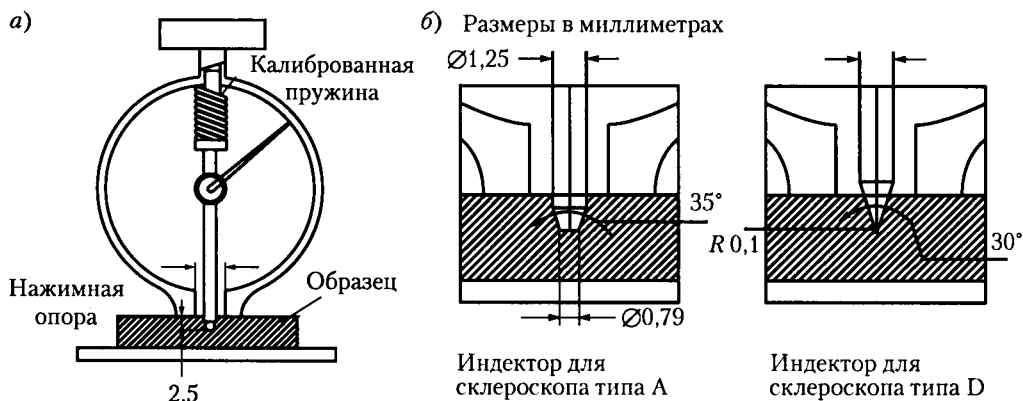


Рис. 9.10. Определение твердости по Шору (а); типы инденторов для испытания твердости по Шору (б)

Не существует никакой простой зависимости между твердостью, измеренной с помощью этого метода испытаний, и другими основными свойствами испытуемого материала.[5].

Для правильного определения твердости очень важно плотно прижать прибор к поверхности образца. Иглу прибора внедряют в образец как можно быстрее, но без удара, держа основание прибора вдоль поверхности образца. Для лучшей воспроизводимости можно прижать прибор к образцу грузом весом 10 Н для типа А и 50 Н — для типа D. Значение твердости по шкале отсчитывают через 15 с после приложения нагрузки. В некоторых случаях замер твердости производят через 1 с после приведения прибора в контакт с образцом [6].

В соответствии с международным стандартом ISO/R. 868 твердость по Шору записывается, например, так: А/45/15. Эта запись включает тип твердомера (А), число твердости (45 единиц) и время отсчета показателя после установления контакта прибора с образцом (15 с). В России испытания материалов на твердость по Шору проводят по ГОСТу 263-75 на твердомере типа ТМ-2 завода «Металлист».

Испытания на удар. При стандартных статических испытаниях, например, испытаниях на растяжение и изгиб, материал поглощает энергию медленно. В действительности обычно материалы быстро поглощают энергию приложенного усилия, например, от падающих предметов, ударов, столкновений, падений и т. д. Целью испытаний на прочность при ударе и является имитация таких условий.

Существует целая группа испытаний, позволяющих оценить прочностные свойства пластических масс при ударных воздействиях. Эти испытания проводят либо на маятниковых копрах (испытания на двухопорный изгиб по Шарпи), либо с помощью падающего груза. Испытание на двухопорный изгиб (по ГОСТу 4647-82) заключается в разрушении образцов с надрезом и без надреза ударом маятника поперек образца, установленного горизонтально на двух опорах.

В ходе испытаний определяют ударную вязкость — величину работы, затраченной на разрушение образца, отнесенную к площади его поперечного сечения или к

площади поперечного сечения образца в месте надреза, а также коэффициент ослабления ударной вязкости, характеризующий отношение ударной вязкости образца с надрезом к ударной вязкости образца без надреза. Испытания ведут при скорости движения маятника 2,9 или 3,8 м/с в зависимости от ударной прочности материала.

Эти испытания могут проводиться при комнатной температуре либо при пониженных температурах для определения хрупкости. Испытуемые образцы могут быть разными по типу и размерам надрезов; обычно применяют образцы в форме брусков с надрезом или без надреза. Число образцов должно быть не менее пяти.

Ударные характеристики материала могут в значительной мере зависеть от толщины образца и ориентации молекул. Разные толщины образцов, используемых в методах ISO и ASTM, могут весьма значительно повлиять на значения прочности при ударе. Например, при испытании образцов из поликарбоната по Изоду изменение толщины образцов с разной молекулярной массой с 3 мм на 4 мм наблюдался даже переход характера разрушения от вязкого к хрупкому [5].

Ударная прочность по Изоду ISO 180 (ASTM D256). Испытания образцов с надрезом на ударную прочность по Изоду стали стандартным методом для сравнения ударной прочности пластмасс. Однако результаты этого метода испытаний мало соответствуют реакции формованного изделия на удар в реальной обстановке [5]. Эти испытания характеризуют скорее чувствительность материала к надрезу, а не его способность выдерживать удар. Результаты этих испытаний широко используются как справочные для сравнения ударных вязкостей материалов. Испытания с надрезом на ударную прочность по Изоду лучше всего применимы для определения ударной прочности изделий, имеющих много острых углов, например ребер, пересекающихся стенок и других мест концентрации напряжений. При испытаниях образцов без надреза результаты всегда выше по сравнению с испытаниями образцов с надрезом из-за отсутствия концентраторов напряжений.

Ударной прочностью образцов с надрезом по Изоду является энергия удара, затраченная на разрушение надрезанного образца, деленная на исходную площадь поперечного сечения образца в месте надреза. Эту прочность выражают в кДж/м². Образец вертикально зажимают в зажимах ударного копра (рис. 9.11).

Результаты испытаний по ISO определяют как энергию удара в джоулях, затраченную на разрушение испытуемого образца, деленную на площадь поперечного сечения образца в месте надреза. Результат выражают в кДж/м².

Результаты испытаний по методу ASTM определяют как энергию удара в джоулях, деленную на длину надреза (т. е. толщину образца). Их выражают в Дж/м. Практический коэффициент пересчета равен 10: т. е. 100 Дж/м равно приблизительно 10 кДж/м².

Ударная прочность по Шарпи (ISO 179, ASTM D256, ГОСТ 4647). Основным отличием методов Шарпи и Изода является способ установки испытуемого образца. При испытании по методу Шарпи образец не зажимают, а свободно устанавливают на опору в горизонтальном положении (рис. 9.12).

Обозначения ISO отражают тип образца и тип надреза: ISO 179/1C обозначает образец типа 1 с надрезом типа C; а ISO 179/2D — образец типа 2 без надреза. Для испытаний по DIN 53453 используют образцы аналогичных типов и размеров. Результаты

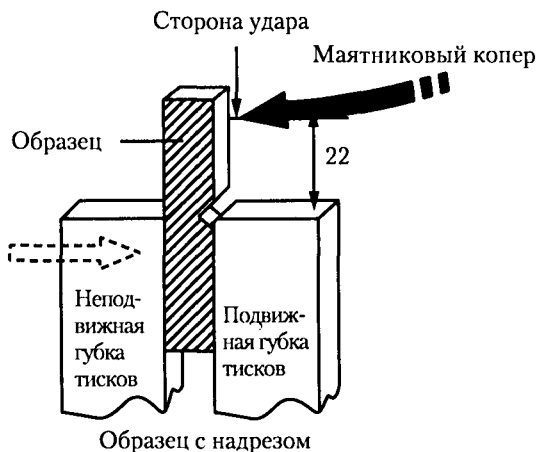


Рис. 9.11. Метод измерения ударной прочности по Изоду

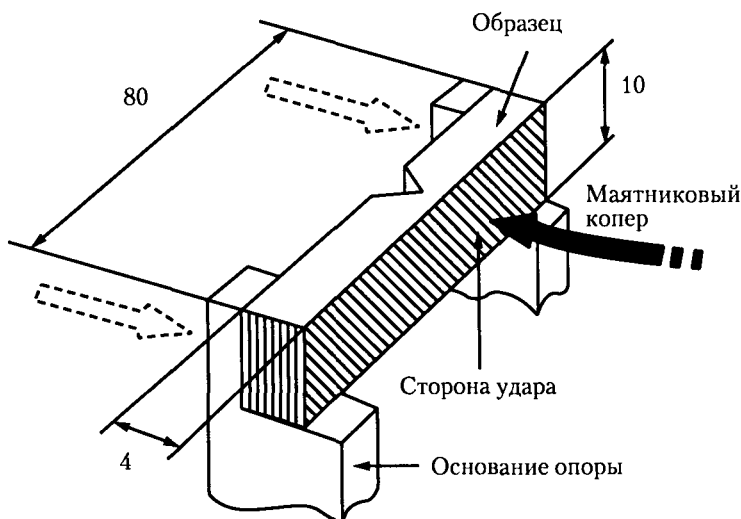


Рис. 9.12. Метод измерения ударной прочности по Шарпи

по ISO и DIN определяются как энергия удара в джоулях, поглощенная испытуемым образцом, деленная на площадь поперечного сечения образца в месте надреза. Эти результаты выражаются в кДж/м^2 .

Испытание падающим грузом. Для определения качества профильных изделий часто проводят испытания на удар падающим грузом. Это испытание обычно применяется для твердых материалов, способных разрушаться при ударных нагрузках.

Сущность испытания заключается в подборе груза и высоты его падения, определяющих работу разрушения образца. В разделе 8.5.1 главы 8 рассматривается испытание падающим грузом образцов оконных профилей в соответствии с ГОСТом 30673-99

«Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков». Сферический боек радиусом 25 мм и массой 1000 г падает с высоты 1500 мм на образец, уложенный на опоры, расстояние между которыми составляет 200 мм. Испытания проводят при температуре -10 или -20 °С.

Подоконники испытывают при температуре $+6$ °С, высота падения 700 мм. Образец считается выдержавшим испытание, если при визуальном контроле на его поверхности не обнаружено трещин, разрушений, отслоений отделочного покрытия. В месте удара на поверхности образца допускаются вмятины. Результат испытания считается удовлетворительным, если испытания выдержали не менее 9 из 10 испытанных образцов [4]. Для других изделий методика испытания может отличаться.

9.3. Испытания, связанные с наличием остаточных технологических напряжений

9.3.1. Определение усадки при прогреве

При формировании изделий из расплава, как указывалось в главе 3, развиваются пластические (необратимые) и высокоэластические (обратимые) деформации. В результате охлаждения расплава высокоэластические деформации в изделии фиксируются («замораживаются»), и изделие получает термодинамически неустойчивую структуру. «Замороженные» высокоэластические деформации являются одной из основных причин возникновения в изделиях остаточных или, как иногда говорят, внутренних напряжений. При определенных условиях (нагреве, воздействии поверхностно-активных сред и пр.) высокоэластические деформации и остаточные напряжения проявляются в виде усадки, коробления, растрескивания изделия. Чем выше их уровень, тем интенсивнее и в большей мере искажается изделие. По величине искажения можно судить об уровне высокоэластических деформаций и остаточных напряжений.

Определение усадки при прогреве является наиболее простым и доступным способом оценки «замороженных» высокоэластических деформаций и уровня остаточных напряжений. При этом различают равновесную усадку (относительное линейное сокращение образца в результате воздействия повышенной температуры в течение определенного времени), при которой полностью реализуются замороженные высокоэластические деформации и образец приходит в равновесное состояние, и эксплуатационную усадку, т. е. усадку, которую может иметь изделие в процессе эксплуатации при повышенной температуре. Как правило, эксплуатационная усадка значительно ниже равновесной. К тому же имеется принципиальное различие в характере усадки аморфных и кристаллизующихся полимеров. Образцы из аморфных полимеров усаживаются при нагреве во всем диапазоне температур нагрева; интенсивность усадки возрастает с увеличением температуры испытания. Кристаллизующиеся полимеры практически устойчивы до температуры начала плавления кристаллитов; после чего усадка до равновесного состояния происходит в течение короткого отрезка времени. При охлаждении образца наблюдается дополнительная усадка, связанная с кристаллизацией полимера. Имеющая место небольшая линейная усадка кристаллизующих-

ся полимеров до $T_{пл}$ связана с наличием в полимере аморфной фазы и реализацией высокоэластических деформаций этой составляющей.

Для определения усадки при прогреве важно правильно установить режимы испытания, а именно температуру нагрева и время выдержки образца при повышенной температуре. Равновесную усадку обычно определяют при прогреве образца в течение 30–60 мин при температуре выше $T_{пл}$ (для кристаллизующихся полимеров) или выше T_c (температура стеклования) для аморфных полимеров. Оптимальные условия испытания обычно определяют экспериментально путем варьирования температуры нагрева и экспозиции до достижения постоянной усадки.

Эксплуатационную усадку определяют, как правило, при максимальной температуре эксплуатации изделия. Режимы испытания приводят в соответствующих нормативных документах на изделия (ТУ, ГОСТах и т. д.). Например, международный стандарт ISO 3480 на полипропиленовые трубы устанавливает максимальные значения допустимой продольной усадки трубы, определяемой при температуре 100 °С и выдержке 2 ч.

Определение продольной усадки D (в направлении вытяжки экструдата) заключается в определении относительного (по отношению к исходной длине) сокращения начальной длины образца после прогрева (в %).

Начальную длину образца принимают обычно не менее 100 мм.

9.3.2. Испытания на растрескивание

Остаточные напряжения, возникающие при формовании изделия, также могут стать причиной его растрескивания. Этот процесс происходит постепенно в течение длительного времени. Процесс растрескивания можно ускорить созданием соответствующих условий, на чем и основан метод качественного определения остаточных напряжений. Для различных материалов подбирают жидкие среды, при воздействии которых на напряженное изделие ослабевают межмолекулярные связи в полимере и появляются трещины. По характеру и числу трещин можно судить о степени напряженности изделия и неравномерности структуры. Так, изделие из жесткого ПВХ подвергают испытаниям в безводном ацетоне или метилхлориде, изделия из АБС-пластика погружают на несколько секунд в ледяную уксусную кислоту. Полиэтиленовые изделия растрескиваются при воздействии на них поверхностно-активных веществ типа ОП-7 или ОП-10. Режимы испытания приводятся в соответствующих нормативных документах.

9.4. Оценка долговечности изделий

Профильное изделие должно эксплуатироваться определенный срок. Полимерные изделия подвержены старению, сокращающему срок эксплуатации, которое обусловлено действием механических нагрузок, климатических факторов, химических сред. При эксплуатации в изделии постепенно накапливаются повреждения, при превышении критического уровня которых происходит разрушение, поэтому важно знать влияние различных факторов на накопление повреждений и прогнозировать продолжительность нормальной эксплуатации изделия (долговечность).

К настоящему времени накоплен большой опыт работы с полимерными материалами, проведены широкие экспериментальные исследования процессов их старения при различных видах воздействий и нагружения. Все это позволяет проводить научно обоснованное прогнозирование гарантийных сроков эксплуатации изделий на основе законов физико-химических процессов старения полимеров.

Для прогнозирования стабильности свойств пластмасс во времени используют два основных подхода. Первый заключается в применении принципов суперпозиции (температурной, частотно-временной, концентрационной и т. п.), проведении ускоренных испытаний и экстраполяции полученных данных на условия хранения и эксплуатации.

Второй подход заключается в моделировании условий эксплуатации полимерных изделий с последующей проверкой сохраняемости эксплуатационных параметров. Подробно оба подхода рассмотрены в работе [7].

Процесс старения одного и того же материала может описываться разными математическими выражениями в зависимости от условий проведения эксперимента. Большинство экспериментальных данных аппроксимируются экспоненциальной зависимостью типа

$$K = K_0 \exp(-At),$$

где t — время наблюдения за какой-либо характеристикой материала.

По кривым старения определяется критическая поврежденность материала, которая соответствует моменту перехода равновесного разрушения в лавинную стадию. Критическую степень поврежденности обычно принимают на уровне 0,5–0,75 от исходной величины оцениваемой характеристики.

В ряде случаев кривые старения имеют более сложный характер, нежели экспоненциальный. Экстремальный характер кинетических кривых свидетельствует о протекании в материале конкурирующих процессов, например, деструкции и восстановления разрушенных связей. S-образный характер указывает на существование автокаталитических процессов.

Научно обоснованный прогноз изменения эксплуатационных свойств изделий из пластмасс может быть осуществлен на базе изучения механизмов всех возможных стадий старения полимера и установления корреляционных зависимостей между кинетикой старения и изменением физико-механических свойств.

Для многих полимеров наблюдается термоокислительный характер старения. Установленная корреляция изменения физико-механических свойств пластмасс с кинетикой накопления продуктов деструкции подтверждает необходимость учета механизма старения при прогнозировании долговечности полимерных изделий.

Наиболее достоверны данные натурных испытаний для оценки применимости изделия при воздействии различных факторов, особенно климатических. Условия натурных испытаний регламентированы рядом отечественных ГОСТов [8–14]. Однако проведение таких испытаний связано с длительностью и значительными материальными затратами. Кроме того, актуальность результатов к моменту их получения зачастую пропадает, поэтому большой интерес представляют испытания пластмасс в искусственных условиях с форсированием процессов, свойственных условиям эксплуатации изделий, которые называют ускоренными климатическими испытаниями.

На основе опыта применения пластмассовых изделий в различных условиях и анализа влияния внешних факторов на свойства изделий выявлены основные факторы, влияющие на стабильность свойств изделий: воздействие тепла, влаги, отрицательных температур, температурных перепадов.

При назначении режимов ускоренных испытаний должно воспроизводиться продолжительное влияние различных температур и влажности воздуха (тепловлагодостойкость), значительное охлаждение (холодостойкость), перепады температур с возникающим при этом напряженным состоянием, переходы температуры через нулевое значение, сопровождаемые образованием росы и инея (сезонная и суточная циклоустойкость). Обобщенный режим ускоренных испытаний должен воспроизводить внешние воздействия в течение года. Эти условия называются условным годом хранения.

Поскольку режимы испытаний выбираются, как правило, эмпирически, то различные методики существенно отличаются друг от друга как по величине суммарной продолжительности, так и по частоте воздействия отдельных факторов. В настоящее время нет строгой методики, позволяющей выяснить, изменение каких свойств материала является первопричиной изменения остальных его свойств. Трудности создания надежных ускоренных лабораторных методов испытания объясняются также отсутствием информации о форме взаимосвязи как между климатическими факторами в натуральных условиях, так и между отдельными видами разрушений пластмасс, вызванных этими факторами.

Анализ литературных данных и нормативной документации свидетельствует о противоречивости подходов к оценке сохраняемости полимерных материалов и методов прогнозирования стабильности их свойств, обусловленных сложностью процессов старения.

На взгляд авторов работы [7] разработка классификации полимеров по механизмам старения с использованием информации о химической кинетике и сочетании этих данных с оптимальными методами обработки экспериментальных данных позволит приблизить результаты расчетов сохраняемости свойств изделий к реальным процессам старения и избежать ошибок при прогнозировании.

9.5. Испытания горючести материалов

Общие сведения о горючести по стандарту UL94. Наиболее широко распространенными стандартами по характеристикам горючести материалов являются стандарты категорий UL94 (научно-исследовательских лабораторий страховых компаний) для пластмасс [5]. Эти категории определяют способность материала к самогашению пламени после воспламенения.

Имеется несколько категорий оценки материалов в зависимости от скорости горения, времени гашения, стойкости к образованию капель и характеристик горючести образующихся капель. Каждому испытываемому материалу может быть присвоено несколько категорий в зависимости от цвета и/или толщины. При выборе материала для конкретного применения категория UL должна определяться по самой тонкой стенке пластмассовой детали. Категория UL всегда должна указываться вместе с толщиной: простое указание категории UL без толщины недостаточно.

Классификационные категории стандарта UL94.

Категория HB. Характеризуется медленным горением горизонтального образца. Скорость горения менее 76 мм/мин при толщине менее 3 мм. Скорость горения менее 38 мм/мин при толщине более 3 мм.

Категория V-0. Горение вертикального образца прекращается в пределах 10 с; образование капель не допускается.

Категория V-1. Горение вертикального образца прекращается в пределах 30 с; образование капель не допускается.

Категория V-2. Горение вертикального образца прекращается в пределах 30 с; допускаются капли горящих частиц.

Категория 5V. Горение вертикального образца прекращается в пределах 60 с после пяти воздействий пламенем с длительностью каждого воздействия на испытуемый образец в течение 5 с.

Категория 5VB. Образцы в виде широких пластин могут прогорать насквозь с образованием отверстий.

Категория 5VA. Образцы в виде широких пластин не должны прогорать насквозь (т. е. не образовывать отверстия) — это самая жесткая категория UL.

Категория UL94HB. Если горючесть является требованием по безопасности, то применение материалов категории HB обычно не допускается. В общем случае материалы категории HB не рекомендуются для применения в электротехнике. Категория UL94HB, хотя и наименее жесткая, является категорией горючести и должна проверяться посредством испытаний.

Категория UL94-5V является наиболее жесткой во всех классификациях UL. Испытания проводятся в два этапа:

- этап 1: стандартные образцы для определения воспламеняемости закрепляют вертикально и подвергают каждый образец пятикратному воздействию пламени с высотой факела 127 мм каждый раз в течение 5 с. Для соблюдения условий испытания ни один образец не должен гореть с появлением пламени или тления более 60 с после пятого воздействия пламени. Кроме того, не допускается образование горящих капель, которые воспламеняют хлопковую подкладку под образцами. Вся процедура повторяется с пятью образцами;
- этап 2: широкая пластина той же толщины, что и пластинчатые образцы, испытывается в горизонтальном положении таким же пламенем. Вся процедура повторяется с тремя пластинами. По этим горизонтальным испытаниям определяют две классификационные категории: 5VB и 5VA.

Схемы проведения испытаний по этапам 1 и 2 показаны на рис. 9.13, а, б.

Категория 5VB допускает сквозное прогорание (с образованием отверстий). Категория 5VA не допускает образование отверстий. Испытания по категории UL94-5VA являются наиболее жесткими по сравнению со всеми испытаниями по методу UL.

В некоторых случаях применяют также [5] испытания раскаленной проволокой (*Hot Wire Ignition — HWI*), которые имитируют тепловые напряжения, которые могут быть вызваны источником тепла или воспламенения, например, перегруженными резисторами или раскаленными элементами; испытания игольчатым пламенем, имитирующими влияние небольших факелов пламени, которые могут возникнуть из-за неисправности внутри электрооборудования и др.

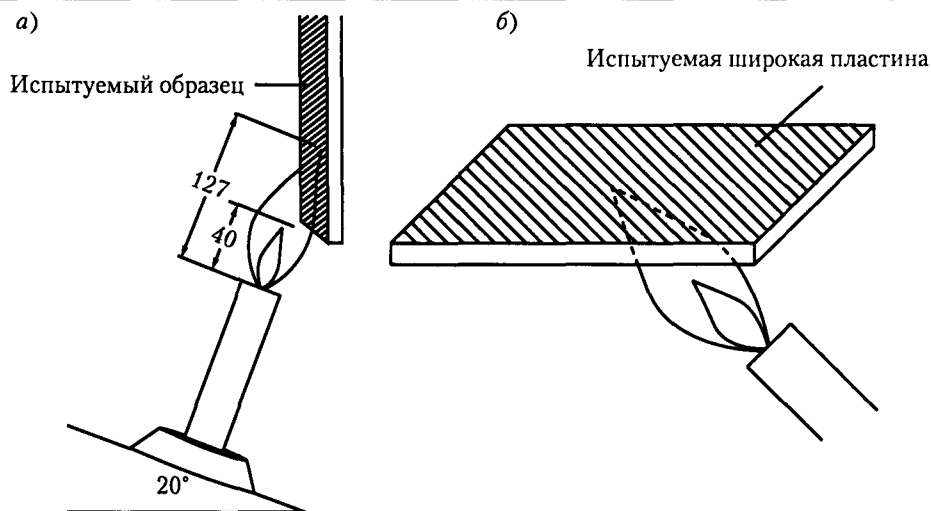


Рис. 9.13. Схемы испытания полимерных материалов на горючесть: (а) — 1-й этап испытания по категориям 5V; (б) — 2-й этап испытания по категориям 5VA и 5VB [5]

Литература

1. Ростовцев А. М. Контроль качества деталей из пластмасс / А. М. Ростовцев; Под ред. В. А. Брагинского. — Л.: Химия, 1984. — 112 с.
2. Богданов В. В. Методы исследования технологических свойств пластмасс / В. В. Богданов; ЛГУ. — Л., 1978. — 144 с.
3. DIN 16941 Профили из термопластов. Допуски на размеры и форму. 1982.
4. ГОСТ 30673-99 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков», МНТКС, 36 с.
5. Методы испытания полимерных материалов // <http://www.polimer.net>.
6. Малкин А. Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А. Я. Малкин, А. А. Асадский, В. В. Коврига. — М.: Химия, 1978. — 330 с.
7. Ракова В. Г. Ускоренные методы испытаний и прогнозирование сохраняемости свойств изделий из пластмасс. Обзорн. информ. / В. Г. Ракова, Н. Н. Городецкая, Т. А. Аптова. — М.: НИИТЭХИМ, 1982. — 27 с. — (Сер. «Переработка пластмасс»).
8. ГОСТ 17170-71, ГОСТ 17171-71 Пластмассы. Методы испытаний на старение под воздействием естественных и искусственных климатических факторов.
9. ГОСТ 16350-70. Климат СССР. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий.
10. ГОСТ 9.703-79. Пластмассы для изделий, предназначенных для эксплуатации в районах с тропическим климатом. Общие требования к выбору и методам испытаний.
11. ГОСТ 16962-71. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытания.
12. ГОСТ 9.035-74. ЕСЗКС. Резины. Метод ускоренного определения гарантийного срока хранения уплотнительных деталей неподвижных соединений.
13. ГОСТ 9.033-74. ЕСЗКС. Резины. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении.
14. ГОСТ 9.707-81. ЕСЗКС. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение.

ГЛАВА 10. МЕТОДЫ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТМАССОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Профильные изделия в большинстве случаев являются полуфабрикатами, которые могут быть составными частями сложных сборных конструкций, состоящих не только из пластмасс, но и из других материалов: металлов, дерева, камня и пр. Для подгонки сопрягаемых деталей и их соединения приходится применять различные методы механической, термической и химической обработки.

Этим вопросам посвящено большое количество публикаций и нет необходимости рассматривать общие положения подробно.

В настоящей главе кратко рассматриваются методы механической обработки профилей для изготовления конструкций (сверление, фрезерование, пробивка отверстий штампами и пр.), способы соединения с другими деталями (сварка, склейка, механическое соединение и т. д.), а также способы поверхностной обработки (декорирование, тиснение, лакирование, печать) для улучшения внешнего вида и повышения долговечности.

10.1. Механическая обработка

Большинство пластмасс легко поддается различным видам механической обработки: сверлению, точению, фрезерованию, штамповке и пр., однако специфические свойства отдельных видов пластмасс оказывают влияние на выбор конструкции режущего инструмента, режимов резания и технологической оснастки. Для резания пластмасс неприемлемы большие скорости резания из-за разогрева инструмента и плавления пластмассы, приводящих к ухудшению внешнего вида обрабатываемой поверхности [1–4].

С другой стороны, многие пластмассы достаточно хрупки и могут разрушаться при кратковременных нагрузках ударного типа (например, при пробивке отверстий,

штамповке). В этих случаях, наоборот, приходится подогревать материал или инструмент. Выбор метода обработки зависит от твердости и пластичности материала и его реакции на прилагаемые нагрузки.

Жесткие пластмассы в процессе производства профильных погонажных изделий подвергаются резке на отрезки заданной длины. Эта резка может осуществляться вращающимся режущим инструментом, рубкой гильотинными ножами, резкой раскаленной проволокой, струей воды под большим давлением, медленным движением скользящего наклонного ножа, как при резке кип бумаги и т. д. Некоторые из типовых схем режущих инструментов в линиях для производства профильных изделий рассмотрены в главе 2.

Геометрия инструмента для резания пластмасс имеет свои особенности. Например, задний угол резцов, сверл, фрез принимается несколько большим, чем у режущего инструмента для обработки металлов, обычно в пределах $12-20^\circ$. Передний угол вследствие низкой прочности пластмасс принимается значительно большим — $15-20^\circ$. Канавки для отвода стружки делают более глубокими, поскольку при обработке образуется большое количество непрерывной стружки [1].

Многие пластмассы чувствительны к концентраторам напряжений: к надрезам, царапинам и хрупко разрушаются по ним при приложении изгибающих напряжений. Особенно чувствительны к ним стирольные пластмассы (УПС, АБС), акрилаты. Более вязкие пластмассы (НПВХ, этролы) менее подвержены хрупкому разрушению по концентраторам напряжений.

Резка дисковыми ножами осуществляется вследствие напряжений среза (сдвига), при этом хрупкие материалы также могут хрупко разрушаться при больших напряжениях и больших скоростях резания; более пластичные материалы менее чувствительны к скорости резания.

Распиловка пластмасс производится дисковыми пилами из быстрорежущей стали. Пилы должны иметь мелкий зуб и хорошо заточены. Пилы с крупным зубом вызывают сколы при резании вследствие ударного воздействия. Удовлетворительные результаты при распиловке дает применение армированных корундовых дисков. К их недостаткам относится невысокая механическая прочность, возможность образования сколов на ободе диска и изгиб диска под действием осевого усилия движущегося профиля. Изгиб диска вызывает образование неровного или кривого торца, что в большинстве случаев недопустимо. Кроме того, при резке толстостенных профилей выделяется много тепла, приводящего к оплавлению поверхности и застреванию диска в пластмассе, поэтому толстостенные профили следует резать металлическими дисковыми фрезами с мелким зубом и с периодическим пропуском одного зуба для предотвращения забивания зубьев стружкой.

Различные перфораторы для пробивания отверстий (например, в сайдингах, уголках для крепления керамической плитки и пр.) работают как непрерывные или периодические штампы, пробивающие отверстия определенной формы (круглые, прямоугольные, многоугольные и пр.) в пластмассе. Эти штампы состоят из набора пуансонов и матриц, установленных с заданным шагом. Привод пуансонов осуществляется от пневмосистемы. Форма режущей кромки пуансона и количество одновременно пробиваемых отверстий в перфораторе зависит от толщины стенки изделия, скорости его продольного движения и пластичности материала.

10.2. Способы соединения изделий из пластмасс

10.2.1. Замковые соединения

Многие профильные изделия для соединения с сопрягаемыми деталями из пластмасс используют упругие свойства материала и специфические конструкции замков. Например, кабель-каналы, представляющие собой сборные конструкции, состоящие из короба и крышки, конструируют таким образом, чтобы фиксация крышки на коробе происходила за счет защелкивания выступа крышки на впадине короба, при этом замок должен обеспечивать возможность относительно простого съема крышки с применением специального инструмента или без него, не повреждая сопрягаемые детали. Соединение пластмассовых деталей этим способом очень просто, быстро и экономично [4].

Качество замковых соединений зависит от деформационных свойств, прочности, коэффициента трения пластмасс, температуры эксплуатации, геометрических характеристик сопрягаемых деталей (высоты, длины и формы выступа, толщины стенок, расположения замкового соединения).

На рис. 10.1 показан пример замковых соединений сопрягаемых жестких профилей. Размеры деталей должны быть выбраны таким образом, чтобы детали в сборе образовывали ровную поверхность без выступов и впадин.

Прочность замкового соединения возрастает с увеличением глубины поднутрения, однако чтобы исключить пластические деформации при сборке сопрягаемых деталей глубина поднутрения должна быть не больше максимального упругого перемещения материала.

Для разъемных замковых соединений рекомендуется применять деформацию равную половине деформации, соответствующей пределу текучести. В табл. 10.1 приведены значения допустимой деформации для некоторых термопластов [4].

Замковые соединения лучше всего применять для конструкционных жестких кристаллизующихся полимеров типа полиформальдегида или полиамидов. Сборка замковых соединений облегчается скруглением кромок или оформлением скосов.

Таблица 10.1. Допустимые упругие деформации для замковых соединений из некоторых термопластов

Материал	Модуль упругости, МПа	Относительная деформация, %
Полиформальдегид	3000	10
Полиамиды 6 и 66	1600–2000	4–5
Поликарбонат	2400	12
Полиэтилентерефталат	3500	5
АБС-пластики	2400	3–5
Полипропилен	1200–1400	12
Полистирол	3200	1–1,5
Полиэтилен	1000	8–10

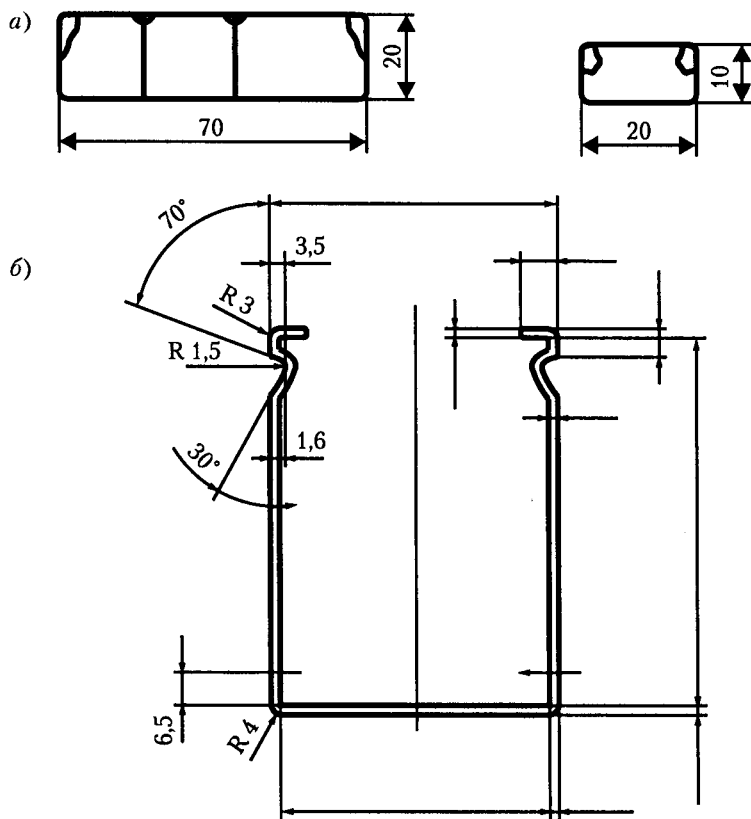


Рис. 10.1. Примеры замковых соединений профильных изделий:
а — некоторые виды кабель-каналов; *б* — форма и размеры короба

Качество замковых соединений оценивают по разъемности и удерживающей силе. Разъемность соединения зависит от угла удержания. При малом угле (менее 0,52 рад) многократная сборка и разборка соединения не представляет проблем, при угле удержания более 1,57 рад замковое соединение может быть разобрано только принудительно [4]. При необходимости многократной разборки одну из деталей (например, крышку кабель-канала) рекомендуется изготавливать из более эластичного материала или оформлять ее конструктивно таким образом, чтобы разборка осуществлялась без особых усилий.

К замковым соединениям, элементы которых при сборке не подвержены деформациям, относят соединения типа «ласточкин хвост» — замок простейшей конструкции, имеющий клиновой распорный вкладыш, который удерживает сопрягаемые детали в напряженном состоянии. Такие соединения разрушаются в результате смятия или среза наружных слоев хвостовика. Расчет подобных соединений для различных материалов рассмотрен в [4].

10.2.2. Соединение гвоздями, шурупами

Некоторые виды пластмасс допускают соединение гвоздями без растрескивания детали. Существует даже специальный термин «гвоздистость», характеризующий способность пластмассы соединяться с помощью гвоздей. Такими свойствами обладают в основном материалы, похожие на дерево, например, композиции пено-ПВХ: из-за наличия пор в материале раскалывающее усилие от гвоздя не распространяется на большое расстояние от точки приложения усилия. Другие материалы для соединения гвоздями рекомендуются предварительно подготовить, для чего в изделии сверлятся отверстия несколько большего диаметра, чем диаметр гвоздя, а гвоздь забивают, подкладывая под головку гвоздя мягкую шайбу, предупреждающую значительные контактные напряжения.

Такие же рекомендации применимы и для соединения пластмасс с помощью шурупов-саморезов. Для компенсации температурных изменений отверстия под шурупы лучше выполнять в виде пазов, а степень прижатия головки шурупа к пластмассовой детали подбирать с учетом возможности изменения длины пластмассового изделия при нагреве или охлаждении. Несоблюдение этого правила может вызвать большие контактные напряжения под головкой шурупа или на боковых сторонах пазов для шурупов.

10.2.3. Соединение сваркой

Сварка пластмасс — это процесс создания неразъемного соединения элементов конструкции, основанный на взаимной диффузии и химическом взаимодействии соединяемых материалов. Сварку применяют, когда соединяемые детали изготовлены из одного материала, когда применение других способов соединения нежелательно или невозможно, а также когда нужно получить герметичное соединение, близкое к монолитному.

Существует много способов сварки полимерных материалов. В зависимости от источника нагревания рассматривают две группы видов сварки: с использованием постороннего теплоносителя (сварка нагретым газом, инструментом или присадочным материалом) и когда тепло генерируется внутри свариваемого материала путем преобразования различных видов энергии (высокочастотная, ультразвуковая, сварка трением, лазерная и пр.). Классификация видов сварки и особенности каждого вида рассматриваются в [1, 4, 5].

Соединение профильных изделий с использованием сварки применяется в основном в специальных целях. Например, сварка оконных рам с помощью контактного разогрева свариваемых профилей и соединения их под давлением является основной технологией изготовления прочных оконных и дверных блоков.

Широко используется экструзионная сварка для герметизации шлангов, получаемых навивкой специальных профилей на оправки, при изготовлении спирально-витых труб из полиэтиленовых полос, при изготовлении витых труб большого диаметра из прямоугольного полого профиля и пр. Получение канализационных труб диаметром до 2 м навивкой прямоугольного профиля из ПЭВП на оправку с одновременной сваркой боковых сторон освоено уже во многих странах, в том числе и в России. Аналогичная проблема для поливинилхлоридных труб еще не решена полностью из-за плохой сварки ПВХ. Подбор оптимальных значений параметров, определяющих прочность неразъемного соединения, — температуры, давления и времени, несомненно позволит решить и эту задачу.



10.2.4. Склеивание

Склеивание — это метод создания неразъемного соединения элементов конструкции с помощью клея, образующего клеевую прослойку, между которой и соединяемыми материалами сохраняется граница раздела. Прослойка является самостоятельной фазой, определяющей свойства соединения. Такое склеивание отличается от сварки. Соединение с помощью клея, при котором клеевая прослойка не образует самостоятельной фазы, а происходит непрерывный структурный переход между соединяемыми материалами, правильнее относить не к склеиванию, а к сварке [4, 6, 7]. В связи с этим соединение материалов с помощью растворителей следует называть сваркой растворителем, а не склеиванием.

В настоящее время склеивание — один из наиболее распространенных методов соединения пластмасс. С помощью склеивания возможно соединение пластмасс между собой и с другими материалами, допускается соединение изделий с большими поверхностями и сложной формы при сохранении структуры и свойств соединяемых материалов.

Применение склеивания для соединения деталей из пластмасс ограничивают значительная продолжительность рабочего цикла и необходимость использования сложной многостадийной технологии для достижения максимальной прочности шва.

Многие виды профильных изделий получили широкое распространение благодаря использованию клеющих лент, с помощью которых изделие прикрепляется к поверхности стен в строительстве, к кузовам легковых и грузовых автомобилей, для герметизации различных щелей при установке уплотнителей окон, раковин, ванн и пр.

Так называемые самоклеющиеся профили-молдинги знакомы многим владельцам легковых автомобилей. Помимо декоративных функций, профильные накладки выполняют и защитную функцию от случайных царапин при неосторожном открывании дверцы. Процесс получения такой декоративно-защитной накладки описан в главе 8.

Для склеивания пластмасс существует очень большое число клеев на основе большинства промышленных полимеров. Среди них имеются клеи для отдельных видов пластмасс и универсальные клеи, которые склеивают большинство материалов. К последним относятся эпоксидные клеи, клеи на основе полиуретана, полиакрилатов, различных каучуков.

Например, клеи-герметики на основе полиуретана обладают хорошими адгезионными свойствами, способностью частично или полностью заменить такие крепежные элементы как шурупы, заклепки, зажимы и т. п., стойкостью к вибрации, старению, низкой объемной усадкой, быстрым отверждением (4–5 мм за сутки), способностью особенно хорошо соединять металлические, а также окрашенные и облицованные поверхности, универсальностью (склеивает пластмассу, металл, листовую сталь и т. д.), достаточно большой жизнестойкостью для обработки больших поверхностей.

Клеи-герметики на основе модифицированного силан-полимера обладают способностью полностью заменить такие крепежные элементы, как шурупы, заклепки, зажимы (т. е. возможностью использования в качестве конструкционного материала); возможностью применения широкого ассортимента материалов без применения грунтовки, особенно при работе с металлом и пластмассой; высокой стойкостью к атмосферным факторам и к ультрафиолетовому излучению; отсутствием запаха и усадки; хорошей эластичностью; отличной сопротивляемостью к истиранию; хорошей сопротивляемостью к старению; хорошей звукоизоляцией.



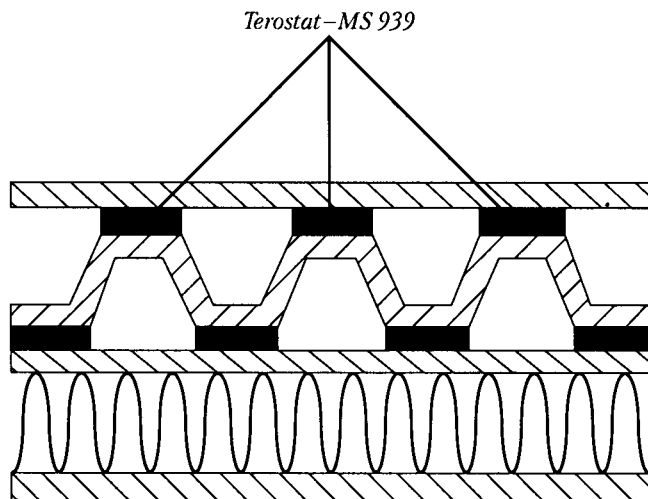


Рис.10.2. Схема изготовления сэндвич-панели склеиванием

На рис. 10.2 показан пример клеевого соединения при изготовлении легких металлических или комбинированных конструкций.

Полиуретановые клеи-герметики применяются для эластичного склеивания и герметизации металлов, пластмасс, а также герметизации соединений и швов в железнодорожных вагонах, в судостроении, в производстве контейнеров, в строительных конструкциях, в пластмассовых и металлических конструкциях, в оборудовании; для приклеивания (монтажа) неоткрывающихся окон (например, лобовых, боковых или задних) в железнодорожных вагонах, на судах, на транспортных средствах или особо надежного эластичного склеивания или герметизации.

Клеи-герметики на основе MS-полимера применяются для эластичной герметизации соединений и швов в железнодорожных вагонах и контейнерах, в металлических и пластмассовых конструкциях, в оборудовании для кондиционирования, тонкой очистки воздуха и вентиляции помещений; для производства вибро- и термоизоляции многослойных соединений; для герметизации производственных помещений, где происходит отливка компонентов электронных приборов или изготовление фильтров.

Однокомпонентные клеи на основе полиуретана не содержат растворителей, твердеют под воздействием влаги, содержащейся в окружающей среде, и имеют различное время жизнеспособности. Наносятся пульверизатором или кистью, отверждение может быть ускорено воздействием повышенной температуры. Однокомпонентные клеи используются для создания многослойных элементов из пористых материалов (таких как дерево), которые могут содержать влагу (в производстве термоизоляционных и звукоизоляционных материалов, фасадного и кровельного покрытия). Такие материалы могут приклеиваться друг к другу, а также к металлам, пластмассе, пенополистиролу, полиуретану, ПВХ и др. Клеи этой серии используются также в автомобильной промышленности для производства многослойных элементов, а также для покрытия пластиковых панелей алюминиевой фольгой.

Двухкомпонентные клеи на основе полиуретана состоят из компонента А (поли-ола) и компонента В (изоцианата), которые перед применением смешиваются в строго определенной пропорции (обычно 5:1). При этом срок хранения готовой смеси может варьироваться от одной минуты до нескольких часов. Смеси с коротким сроком хранения готовятся автоматическим способом с применением дозаторов. Вязкость таких смесей может варьироваться в широких пределах. Двухкомпонентные клеи используются для склеивания полистирола, пено-ПВХ, пенополиуретана, неорганических волоконсодержащих и других изоляционных материалов, керамической плитки с загрунтованными металлическими поверхностями, деревом, каменной кладкой, бетоном, пластиковыми панелями. Пригодны для наружных работ. Основная область применения — производство сэндвич-панелей с любым видом наполнителя, изготовление автомобильных фильтров и т. д.

Профилированные герметизирующие ленты на основе бутилкаучука и полиизобутилена показывают хорошую совместимость с различными материалами и хорошие адгезионные свойства при контакте со всеми сухими поверхностями. Они просты в обращении, поставляются в рулонах или катушках, а также в емкостях для промышленного потребления.

10.3. Поверхностная обработка профильных изделий (декорирование)

В настоящее время производители профилей ПВХ предлагают потребителю широкий выбор расцветок поверхности пластиковых профилей от однотонных цветов (красного, зеленого, синего, голубого и др.) до различных декоров под дерево. Цветные профили стоят в среднем на 10–15 % дороже, чем белые.

10.3.1. Окрашивание в массе

Многие профильные изделия изготавливаются из окрашенных материалов. Краситель (пигмент) добавляется в исходный материал при приготовлении композиции или в бункер машины в виде гранулированного суперконцентрата в определенной пропорции к исходному неокрашенному материалу. Возможно также применение дозирующих устройств для окрашивания материала в цилиндре экструдера.

Использование гранулированных суперконцентратов больше характерно для производства окрашенных изделий на одношнековых машинах. Порошкообразные композиции с красителем чаще используют при переработке материалов на двухшнековых машинах.

Суперконцентраты красителей для пластмасс. Суперконцентраты красителей для полимеров (СКП или *masterbatch*) — это гранулированный полимер с большим содержанием красящего вещества (20–50%). Они добавляются при экструзии в небольших количествах к основному материалу и за счет смесительного воздействия шнека равномерно распределяются в расплаве перерабатываемого материала. Использование суперконцентратов для окрашивания в массе поможет воплотить в продукте любой цветовой дизайн, удовлетворяя требованиям безопасности, экологичности, при

этом себестоимость конечного продукта возрастает незначительно, поскольку расход СКП не велик и составляет от 0,1–5%.

Суперконцентраты красителей в настоящее время существуют практически для любых термопластов. Долгое время не было качественных красителей для окраски профилей из жесткого ПВХ. Приходилось применять концентраты для пластифицированного ПВХ. Но для этого требовалось повышенный расход красителей и качество окрашивания жестких композиций было недостаточно высоким. В последние годы такие суперконцентраты для НПВХ появились в ряде зарубежных фирм.

10.3.2. Ламинирование профилей

Для декоративной отделки профилей ПВХ, например, имитации под дерево, используется способ *ламинирования поверхности профилей ПВХ прочной пленкой*, наружная сторона которой отличается высокой стойкостью к атмосферным воздействиям, а также к ультрафиолетовым лучам и надолго сохраняет яркость расцветки. Ламинат, в основном, воспроизводит структуру дерева: имитация текстуры дуба натурального, светлого и темного, а также красного дерева, однако используются и другие самые разнообразные расцветки акриловых пленок. Профили ПВХ могут быть ламинированы акриловыми пленками как с одной, так и с двух сторон.

Профили нагревают до нужной температуры и покрывают слоем клея, затем путем термической активации наклеивают пленку на профиль с помощью прижимных роликов. В ходе производственного процесса адгезия пленки к профилю подвергается постоянному и строгому контролю.

10.3.3. Нанесение печати

Некоторые виды профилей имеют на поверхности печатный рисунок. В основном нанесение печатного рисунка применяется для декоративных строительно-отделочных профилей. Нанесение рисунка печатью осуществляется с помощью специальных печатающих машин, осуществляющих перенос рисунка на твердые плоские или криволинейные поверхности профилей. Вопросы нанесения рисунков методом печати рассмотрены в главе 8.

Литература

1. Яковлев А. Д. Технология изготовления изделий из пластмасс / А. Д. Яковлев. — Л.: Химия, 1968. — 304 с.
2. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием / А. Кобаяши. — М., 1974.
3. Бортников В. Г. Основы технологии переработки пластических масс / В. Г. Бортников. — Л.: Химия, 1983 — 304 с.
4. Комаров Г. В. Способы соединения деталей из пластических масс / Г. В. Комаров. — М., Химия, 1979. — 288 с.
5. Тростянская Е. Б. Сварка пластмасс / Е. Б. Тростянская, Г. В. Комаров, В. А. Шишкин. — М.: Машиностроение, 1967. — 252 с.
6. Москвитин Н. И. Склеивание полимеров / Н. И. Москвитин. — М.: Лесная промышленность, 1968. — 304 с.
7. Кардашев Д. А. Полимерные клен. Создание и применение / Д. А. Кардашев, А. П. Петрова. — М.: Химия, 1983. — 256 с.
8. Клеи Терозон.// <http://www.industrialsolutions.ru/>

Приложение 1

Содержание типового технологического регламента (2002 г.)

1. Общая характеристика производства и его технико-экономический уровень.
 2. Характеристика производимой продукции.
 3. Характеристика применяемого сырья и материалов.
 4. Описание технологического процесса и схемы.
 5. Материальный баланс.
 6. Нормы расхода сырья, материалов и энергоресурсов.
 7. Характеристика образующихся отходов и направление их использования.
 8. Нормы технологического режима и контроль производства.
 9. Возможные отклонения от нормального хода технологического процесса, их причины и способы устранения.
 10. Охрана окружающей среды.
 11. Безопасная эксплуатация производства.
 12. Спецификация основного технологического оборудования.
- Перечень использованной литературы.
- Приложение. Технологическая схема производства.

Приложение 2

Некоторые стандарты и технические условия на экструдированные профили из термопластов и ТЭП

№ стандарта или ТУ	Наименование стандарта или технических условий	Общая характеристика
ГОСТ 19111-2001 разработан ООО «Полимер-стройматериалы» взамен ГОСТа 19111-77. Введен в действие с 1 июля 2003 г. в качестве государственного стандарта РФ	Изделия погонажные профильные поливинилхлоридные для внутренней отделки. Технические условия	Стандарт распространяется на профильные погонажные изделия различного поперечного сечения, изготавливаемые способом экструзии на основе поливинилхлорида или его сополимеров с различными добавками и предназначенные для применения в строительстве. По твердости и гибкости изделия делятся на мягкие, полужесткие и жесткие. Максимальная ширина — 180 мм, максимальная толщина — 9 мм
ГОСТ 30673-99 разработан Управлением стандартизации, технического нормирования и сертификации Госстроя России при участии фирмы ЗАО «КВЕ Оконные технологии», ОАО «Полимер-стройматериалы», НИУПЦ «Межрегиональный институт окна»	Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков. Технические условия	Стандарт распространяется на профили поливинилхлоридные белого цвета, окрашенные в массу, для оконных и дверных блоков, изготавливаемые способом экструзии из композиций на основе непластифицированного поливинилхлорида повышенной ударной вязкости и стойкости к климатическим воздействиям Требования стандарта распространяются также на поливинилхлоридные профили, изготавливаемые способом экструзии и предназначенные для комплектации оконных и дверных блоков (наличники, нащельники, подоконные доски, соединители, расширители и др.) Стандарт может быть использован для целей сертификации
Межгосударственный стандарт ГОСТ 30778-2001 (утвержден и введен в действие постановлением Госстроя РФ от 24 декабря 2001 г. № 126). Дата введения 1 июля 2002 г. Введен впервые	Прокладки уплотняющие из эластомерных материалов для оконных и дверных блоков. Технические условия	Стандарт распространяется на уплотняющие прокладки из монолитных эластомерных материалов для оконных и дверных блоков (далее — уплотнители), изготавливаемые методом экструзии и предназначенные для уплотнения различных типов оконных и дверных блоков, монтажных соединений стеклопакетов и других светопрозрачных конструкций. Требования стандарта не распространяются на самоклеющиеся уплотнители Требования настоящего стандарта являются обязательными (кроме оговоренных в тексте как рекомендуемые или справочные) Стандарт может быть использован для целей сертификации

Окончание приложения 2

№ стандарта или ТУ	Наименование стандарта или технических условий	Общая характеристика
ТУ 5772-007-39857828-00 ООО «Стройполимер», пос.Тучково Москов- ской обл.	Профили НПВХ для на- ружного применения	Стеновые панели гладкие (без впадины) шириной 100 мм для наружного и внутреннего применения
ТУ 2247-009- 18425183-2002 ОАО НПО «Пластик»	Изделия профильные об- лицовочные из суспен- зионного поливинил- хлорида	Облицовочные стеновые панели шириной 125 мм с впадиной и комплекту- ющие профили для наружного и внутреннего применения
ТУ 5775-011-00149279-01 ЗАО «Уралэластотех- ника»	Уплотнители из термо- эластопласта для окон и дверей	Уплотнительные прокладки по типу уплотнителей фирмы <i>Deventer</i> , ФРГ
ТУ 2248-001-5766624-92 ОАО «Московский нефтеперерабатываю- щий завод» http://mnpz.narod.ru	Стержень полый поли- пропиленовый	Предназначен для экранирования титановых матриц в электролизных ван- нах. Температура эксплуатации до 100 °С. Размеры: от 10 × 3,5 до 20 × 7,5
ТУ 2246-001-10489953-98 ООО «Этиол», г. Вла- димир	Листы на основе вспенен- ного полиэтилена и сэ- вилена	Химически сшитый пенополиэтилен и пеносэвилен с кажущейся плотнос- тью 65–220 кг/м ³

Приложение 3

Основные отечественные производители материалов для изготовления профильных изделий

Поливинилхлорид и композиции на его основе

- ОАО «Саянскимпром», г. Саянск — полимер ПВХ
- ЗАО «Каустик», г. Стерлитамак — полимер ПВХ
- ОАО «Капролактам», г. Дзержинск — полимер ПВХ
- ОАО «Азот», г. Новомосковск — полимер ПВХ
- ОАО «Химпром», г. Волгоград — полимер ПВХ
- ОАО «Пласткард», г. Волгоград — порошкообразные и гранулированные композиции (совместно с фирмой *Solvay*, Бельгия)
- ОАО «Полигран», г. Тверь — гранулированные композиции пластифицированного и жесткого ПВХ (совместно с фирмой *Solvay*, Бельгия)
- ОАО «Биохимпласт» (г. Нижний Новгород — разработчики, г. Апрелевка, Московская обл. — производственная база)
- ОАО «Владимирский химический завод», г. Владимир — гранулированные композиции пластифицированного и жесткого ПВХ

Полиолефины

- ОАО «Казаньоргсинтез», г. Казань — ПЭНП, ПЭВП
- ОАО «Ставропольполимер», г. Буденновск — ПЭВП, ПЭСП
- ОАО «Московский нефтеперерабатывающий завод», г. Москва — ПП («Каплен»)
- ОАО «Томский нефтехимический комбинат», г. Томск — ПЭНП, ПП, ВМПЭ
- ОАО «Уфаоргсинтез», г. Уфа — ПЭНП, ПП
- ОАО «Салаватнефтеоргсинтез», г. Салават — ПЭНП
- ОАО «Сэвилен», г. Казань — Сэвилен (сополимер этилена с винилацетатом)

Стирольные пластики

- ОАО «Омскимпром», г. Омск — УПС, сополимер МСН
- ОАО «Пластик», г. Узловая — АБС, пенополистирол
- ОАО «Салаватнефтеоргсинтез», г. Салават, — АБС, пенополистирол
- ОАО «Ангарская нефтехимическая компания», г. Ангарск — ПС, пенополистирол

Полиамиды

- Уральское ОАО «Пластик», г. Екатеринбург — ПА-12, пластифицированный ПА-12, ПА6, ПА66, ПА610
- ОАО «Карболит», г. Орехово-Зуево — ПА6, ПА66, стеклонаполненный ПА66



Полиформальдегид

Уральская химическая компания (ОАО «Уралхимпласт»), г. Нижний Тагил — ПФА, сополимер «Арилокс»

Полиакрилаты

ОАО «Оргстекло», г. Дзержинск — ПММА

Поликарбонат

ОАО «Заря», г. Дзержинск — литые и экструзионные марки ПК

Термоэластопласты

Уральская химическая компания (ОАО «Уралхимпласт»), г. Нижний Тагил — ТЭП на основе ПВХ и каучука





Приложение 4

Зарубежные производители экструзионных линий и оснастки для производства профильных изделий

Фирма, страна	Производимое оборудование	Адреса для связи
Battenfeld Extrusionstechnik GmbH, ФРГ	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными и коническими шнеками	www.sms-k.com
Krauss-Maffei, ФРГ	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров, в т. ч. конических	www.krauss-maffei.de e-mail: info@krauss-maffei.de
Hans Weber Maschinenfabrik GmbH, ФРГ	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными и коническими шнеками	www.hansweber.de e-mail: weber.kc@t-online.de
Theysohn Maschinenbau GmbH, ФРГ	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров, в т. ч. конических	www.theysohn.de e-mail: info@theysohn.de
Plama Plastik Maschinen GmbH, ФРГ	Оборудование бывшее в употреблении ведущих европейских фирм (на базе одно- и двухшнековых экструдеров)	www.plama.de e-mail: info@plama.de
Cincinnati Extrusion, Австрия	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров, в т. ч. конических	www.cet-austria.com e-mail: player.r@cet-austria.com
Greiner Extrusionstechnik GmbH, Австрия	Комплектующее оборудование, оснастка к линиям CE, KM и др.	www.greiner-extrusion.ru e-mail: office@greiner-extrusion.at
Technoplast Kunststofftechnik GmbH, Австрия	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными шнеками	www.technoplast.at e-mail: technoplast@technoplast.at
Topf Kunststofftechnik GmbH, Австрия	Экструзионная оснастка для оконных профилей, кабель-каналов, водосточных желобов, профилей из пенопластов, многослойных труб и др.	e-mail: office@topf.at
A+G Extrusion Technology GmbH, Австрия	Оборудование и оснастка для производства профильных изделий	www.gruberextrusion.com e-mail: a+g@gruberextrusion.com Представительство в России: e-mail: moiscow@gruberextrusion.com
Amut S. p. A., Италия	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными шнеками	www.amut.it e-mail: amut@amut.it
Bandera S. p. A., Италия	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными шнеками	www.lbandera.it e-mail: lbandera@bandera.com



SINAPLAST

Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sinap_m@mail.ru
Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.

Окончание приложения 4

Фирма, страна	Производимое оборудование	Адреса для связи
Bausano Group S. p. A., Италия	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными шнеками	www.extrusion.ru www.extrusion.it e-mail: info@bausano.it
Friul Filiere S. p. A., Италия	Линии на базе двухшнековых экструдеров, оснастка для профилей, в т. ч. для дверных пенопанелей и комплектующих профилей	www.friulfiliere.it e-mail: friulfiliere@friulfiliere.it
Omipa Extrusion Machinery, Италия	Установки для производства картонопласта и сотовых листов	www.omipa.it e-mail: omipa@omipa.it
Trimec Plastic Processing Machinery, Италия	Установки для производства профилей, труб и др.	Официальный представитель в странах СНГ: ИП «Рэкун Пластик», Беларусь, г. Минск www.extrusion.by e-mail: info@extrusion.by
Microsan Makine Ve Kalip Sanayi A.S., Турция	Линии на базе одно- и двухшнековых экструдеров с параллельными шнеками	www.mikrosanmakine.com e-mail: mikrosan@superonline.com
Boruser Plastik & Makina SAN, ve TIC.LTD., Турция	Линии для производства профилей и труб	Представительство в России: ООО «ПроПласт» Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орудьево Тел.: (095) 999-1090 Факс: (095) 187-9613 e-mail: info@yelkenciler.com
Yelkenciler Makina SAN, ve TIC.LTD, Турция	Линии для производства профилей и труб	Представительство в России: ООО «Елкенчилер Машинери» г. Щелково, Московская обл. www.ruplast.com e-mail: info@ruplast.com
Calcen Machinery Co, Ltd, Тайвань Everplast Machinery Co.,Ltd	Оборудование и оснастка для производства профильных изделий	www.everplast.com.tw e-mail: ev7271@ms8.hinet.net Представительство в России: Каэлер Холдинг АГ www.kaeler.com e-mail: postmaster@kaeler.com

Приложение 5

Производители системных ПВХ-профилей в России [«Окна, двери», 2003, №2]

Предприятие	Местонахождение производства	Профильная система	Год начала выпуска
Группа предприятий «Профиль»: г. Новосибирск		<i>Roplasto</i>	1989
«Профиль-С», «Плюс Тек С» (СП «Профиль»- <i>Plus Plan</i>)		<i>Plus Tec</i>	1999
«Стройпласт»	г. Казань	Стройпласт	1989
«ЦентргазПластик» («Интер- стройгазкомплект»)	г. Смоленск	Аналог <i>Rehau</i> ЦгП	1996 1998
Промышленная группа «Русский щит» («Интерстройпласт», «Глобал Шилд»)	Москва	Weltplast	1996
«Мосстройпластмасс»	г. Мытищи, Московская обл.	В настоящее время выпуск приостановлен	1998
«БФК»	г. Новосибирск	БФК	1998
«Профиль» («Трубоизоляция»)	г. Новокуйбышевск, Самарская обл.	<i>S-286</i>	1998
«Самарские Оконные Конструкции» («СОК»)	г. Сызрань, Самарская обл.	<i>S-311</i>	1999
«Кему-Строй-Экструзия» (СП «Кеммерлинг»- «БАМО»-«Гренцланд»)	г. Солнечногорск, Московская обл.	<i>Koemmerling</i>	1999
«Века Рус» (дочернее предприятие « <i>Veka AG</i> »)	Наро-Фоминский район, Московская обл.	<i>Veka</i>	1999
«Proplex»	г. Подольск, Московская обл.	<i>Proplex</i>	2000
«Альфа-Пластик»	г. Челябинск	<i>Roplasto</i>	2000
«Профиль-У»	г. Челябинск	Профиль Ура- ла-2000	2000
«Росэкко-Пакпласт»	г. Дзержинский, Московская обл.	Плафен	2000
«Каустик-Стройпласт»	г. Стерлитамак, Башкортостан	Каустик	2000
«Тантал»	г. Саратов	На базе <i>Actual</i> (<i>Panorama</i>)	2000
«HT Troplast»/«КВЕ»	г. Воскресенск, Московская обл.	КВЕ, <i>Trocal</i>	2000
«Домостил»	г. Пермь	Домостил-2000	2000



Приложение 6

Производственные мощности изготовителей оконных профилей [«Окна, Двери», 2003, №2]

Предприятие, местонахождение	Число экструдеров	Фирма-изготовитель установленного экструзионного оборудования/ оснастки	Производ- ственная мощность предприятия, тыс. т/г
Группа предприятий «Профиль» (г. Новосибирск)	8	<i>Amut, H. Weber, Theysohn, Ahenbach</i>	До 4,0
«Стройпласт» (г. Казань)	8	<i>Amut</i>	4,0
«ЦентргазПластик» (г. Смоленск)	3	<i>Bausano</i>	Н/д
Группа «Русский щит» (Москва)	9*	<i>Technoplast, Bausano, Krauss-Maffei</i>	До 6
«Мосстройпластмасс» (г. Мытищи, Московская обл.)	2	<i>Krauss Maffei/Greiner</i>	Н/д
«БФК» (г. Новосибирск)	2	Н/д	Н/д
«Трубоизоляция» (ООО «Про- филь») (г. Новокуйбышевск)	4	<i>Krauss Maffei/Greiner</i>	2,6
«Самарские Оконные Конструкции» (г. Сызрань)	3	<i>Cincinnati/Greiner</i>	До 5,0
«Кему-Строй -Экструзия»	4	<i>H. Weber</i>	3,0
«Века Рус» (г. Наро-Фоминск, Мос- ковская обл.)	3	<i>H. Weber</i>	3,0
«Проплекс» (г. Подольск, Москов- ская обл.)	3	<i>Technoplast/Cincinnati</i>	До 5,0
«Альфа- Пластик» (г. Челябинск)	6	<i>Amut, Technoplast, Cincinnati Extrusion/ Greiner, Theysohn, Microsan</i>	Н/д
«Профиль-У» (г. Челябинск)	4	<i>Amut/Technoplast</i>	До 4,5**
«Росэчко-Пакпласт», (г. Дзержин- ский, Московская обл.)	3	<i>Krauss Maffei/Topf</i>	До 5,0
«Каустик-Стройпласт», (г. Стерли- тамак)	2	<i>Technoplast</i>	1,5–2,0
«Акис»	2***	<i>Technoplast</i>	1,5
«Домостил» (г. Пермь)	1	<i>Technoplast</i>	1,0
«Тантал» (г. Саратов)	1	<i>Battenfeld Extrusietechnik</i>	Н/д
«НТ Troplast»/«КВЕ» (г. Воскре- сенск, Московская обл.)	2 + 2 коэк- струдера	<i>Battenfeld</i>	3,0

* В том числе 3 экструдера в стадии освоения.

** Вместе с другой продукцией (кабель-каналы).

*** В производстве оконных профилей задействован 1 экструдер.



SINA-PLAST

Полимерное машиностроение КНР,
поставки оборудования в Россию и страны СНГ.
Тел. (095) 933-3437, www.sinaplast.ru, e-mail: sina_m@mail.ru

Приложение 7

Прикладное программное обеспечение для моделирования процессов переработки пластмасс

7.1. Общие сведения о CAD/CAM/CAE-системах [WEB Site «АБ Универсал»]

CAD-системы (*computer-aided design* — компьютерная поддержка проектирования) предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации (системы автоматизированного проектирования — САПР). Как правило, в современные CAD-системы входят модули моделирования трехмерной объемной конструкции (детали) и оформления чертежей и текстовой конструкторской документации (спецификаций, ведомостей и т. д.). Ведущие трехмерные CAD-системы позволяют реализовать идею сквозного цикла подготовки и производства сложных промышленных изделий.

Примеры: ACAD 2000, 2002, 2004; *Mechanical Desktop*, R6; *Inventor*, R5.3, R6 (компания Autodesk); *Solid Works*-Россия; Компас-3D, R5.11, R6.0 (фирма «Аскон», Россия), *T-Flex* версии 7.2, 8.0 (АО «Топ Системы», Россия) и др.

В свою очередь, **CAM-системы** (*computer-aided manufacturing* — компьютерная поддержка изготовления) предназначены для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи программ для этих станков (фрезерных, сверлильных, эрозионных, пробивных, токарных, шлифовальных и др.). CAM-системы еще называют системами технологической подготовки производства. В настоящее время они являются практически единственным способом для изготовления сложнопрофильных деталей и сокращения цикла их производства. В CAM-системах используется трехмерная модель детали, созданная в CAD-системе.

Примеры: Программы *GEMMA-3D* (НТЦ ГеММа), *SurfCAM Software*, *T-Flex* ЧПУ, *T-Flex NC Tracer* (АО «Топ Системы»), Компас-Автопроект.

CAE-системы — (*computer-aided engineering* — поддержка инженерных расчетов) представляют собой обширный класс систем, каждая из которых позволяет решать определенную расчетную задачу (группу задач), начиная от расчетов на прочность, анализа и моделирования тепловых процессов до расчетов гидравлических систем и машин, расчетов процессов литья. В CAE-системах также используется трехмерная модель изделия, созданная в CAD-системе. CAE-системы еще называют системами инженерного анализа.

Примеры: *T-Flex*/Пресс-формы (проектирование литьевых форм для литья под давлением термопластов), *T-Flex*/ИСПА (система прочностного конечно-элементного анализа изделий), *MSC Nastran* для *Windows* (большой набор модулей для расчета конструкций по МКЭ), *PolyFlow* (фирма *Fluent Inc.*, Бельгия) — прикладная программа компьютерного моделирования процессов течения и охлаждения полимерных материалов.

7.2. Прикладные программы по экструзии Отдела экструзии Института по переработке пластмасс, г. Аахен, ФРГ

- *MOTEX* — расчет экструдеров и шнеков;
- *PROWEX* — реологический анализ экструзионных головок;
- *ERKON* — численное моделирование процессов охлаждения при экструзии с раздувом;
- *HEIZEN* — компьютерное моделирование процессов нагрева и охлаждения;
- *BILAN* — работа одношнековых экструдеров;
- *RHEOGRAF* — интерпретация измерений на капиллярных реометрах и определение параметров реологической модели.

(С вопросами обращаться к Dr.-Ing. J. van Marwick

Тел.: 0241-803819

Факс: 0241-8888262

e-mail: vanmarwick@ikv.rwth-aachen.de)

Приложение 8

Методы испытаний пластмасс. Группа Л29

	Название стандарта	Стандарт
1	<i>Общие требования</i>	
1.1	Пластмассы. Изготовление образцов для испытаний из термопластов. Общие требования	ГОСТ 12019-66
1.2	Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)	ГОСТ 12423-66
1.3	Пластмассы. Изготовление образцов литьем под давлением и прессованием для оптических испытаний термопластов	ГОСТ 19679-74
1.4	Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки	ГОСТ 26277-84
2	<i>Механические испытания</i>	
2.1	Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи	ГОСТ 4647-80
2.2	Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб	ГОСТ 4648-71
2.3	Пластмассы. Метод испытания на сжатие	ГОСТ 4651-82
2.4	Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе	ГОСТ 9550-81
2.5	Пластмассы. Метод испытания на растяжение	ГОСТ 11262-80
2.6	Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования	ГОСТ 14359-69
2.7	Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении	ГОСТ 18197-82
2.8	Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду	ГОСТ 19109-84
2.9	Пластмассы. Метод определения твердости по Шору	ГОСТ 24621-81
2.10	Пластмассы. Метод определения твердости по Роквеллу	ГОСТ 24622-81
3	<i>Физические, химические, реологические свойства</i>	
3.1	Пластмассы. Методы определения водопоглощения	ГОСТ 4650-80
3.2	Пластмассы. Метод определения ПТР термопластов	ГОСТ 11645-73
3.3	Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред	ГОСТ 12020-72
3.4	Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)	ГОСТ 15139-69
3.5	Пластмассы. Методы определения гигиенических показателей	ГОСТ 22648-77
4	<i>Теплофизические характеристики</i>	
4.1	Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика	ГОСТ 15088-83
4.2	Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения	ГОСТ 15173-70
4.3	Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при изгибе	ГОСТ 16782-83
4.4	Пластмассы. Метод определения температуры плавления	ГОСТ 21553-76
4.5	Детали соединительные из термопластов. Методы определения изменения внешнего вида после прогрева	ГОСТ 27077-86
4.6	Трубы из термопластов. Методы определения изменения длины труб после прогрева	ГОСТ 27078-86

Окончание приложения 8

	Название стандарта	Стандарт
5	<i>Горючесть материалов</i>	
5.1	Пластмассы. Метод определения поведения пластмасс при контакте с раскаленным стержнем	ГОСТ 10456-80
6	<i>Оптические характеристики</i>	
6.1	Пластмассы. Методы определения коэффициента пропускания и мутности	ГОСТ 15875-80
6.2	Пластмассы. Методы определения показателя преломления	ГОСТ 19927-74
7	<i>Электрические характеристики</i>	
7.1	Пластмассы. Метод определения электростатических свойств	ГОСТ 16185-82
7.2	Пластмассы электропроводящие. Метод определения удельного объемного электрического сопротивления при постоянном напряжении	ГОСТ 20214-74
8	<i>Поливинилхлорид</i>	
8.1	Пластмассы. Метод определения насыпной плотности формовочных масс, просыпаемых и не просыпаемых через воронку	ГОСТ 11035-64
8.2	Поливинилхлорид и сополимеры винилхлорида. Метод определения числа вязкости разбавленных растворов и значения К	ГОСТ 14040-82
8.3	Поливинилхлорид и сополимеры винилхлорида. Метод определения термостабильности ПВХ, сополимера винилхлорида и композиций на их основе с помощью индикатора «конго красный»	ГОСТ 14041-68
8.4	Поливинилхлорид и сополимеры винилхлорида. Метод определения содержания влаги и летучих веществ	ГОСТ 14043-78
8.5	Поливинилхлорид. Метод определения содержания веществ, экстрагируемых метанолом или диэтиловым эфиром	ГОСТ 24947-81
8.6	Поливинилхлорид. Метод определения загрязнений и посторонних веществ	ГОСТ 25138-82
8.7	Пластмассы. Метод определения сыпучести	ГОСТ 25139-82
8.8	Поливинилхлорид. Метод определения поглощения пластификатора методом центрифугирования	ГОСТ 25265-82
8.9	Поливинилхлорид и сополимеры винилхлорида. Метод определения хлора	ГОСТ 25303-82
8.10	Поливинилхлорид и сополимеры винилхлорида. Хроматографический метод определения винилхлорида	ГОСТ 25737-83

Приложение 9

Некоторые полезные ссылки в Интернете

9.1 Брошюры по экструзии фирмы Krauss-Maffei (Extrusion Technology)

WEB Site: <http://www.krauss-maffei.de>.

1. Одношнековые экструдеры.
2. Двухшнековые экструдеры.
3. Спиральные распределители в головках для производства труб из полиолефинов.
4. Дорнодержатели со спицами в экструзионных головках для производства полиолефиновых труб.
5. Экструзионные линии и головки для производства ПВХ труб.
6. Техническая помощь фирмы Krauss-Maffei по обслуживанию экструзионных линий.
7. Модульная система С4 по управлению экструзионными линиями.
8. Промышленные линии для производства труб.
9. Экструдеры длиной 36D с двойной системой дегазации.
10. Восстановление шнеков и цилиндров — эффективная альтернатива по снижению затрат на оборудование.
11. Системные решения по экструзии листов и пленки из ПВХ.
12. Линии и оснастка для прямой экструзии высоконаполненных систем (*Direct Extrusion*).
13. Установки для гранулирования ПВХ.

9.2. Ресурсы Интернет по термоэластопластам (ТЭП)

Более подробную информацию по термопластичным эластомерам и их переработке см. в новой версии CD «Литье пластмасс» на сайте «АБ Универсал» (обновление 26.08.03) (e-mail: igor.abuniver@mtu-net.ru, (С) Барвинский И. А., Барвинская И. Е., 2000–2003).

Общее

Термопластичные эластомеры ТРЕ (обзор типов, сравнительные характеристики).

Термопластичные эластомеры фирмы Advanced Elastomer Systems (AES).

ТРО

Термопластичные олефиновые эластомеры ТРО (PP/EPDM). Свойства, характеристики, цены, применение, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература.

TPV (TPR)

Термопластичные вулканизированные эластомеры — термопластичная резина (TPR, TPV). Свойства, характеристики, цены, применение, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература. Термопластичные эластомеры *Forprene* фирмы *PolyOne* (марочный ассортимент). Термопластичные эластомеры *Sarlink* фирмы *DSM Elastomers* (марочный ассортимент).

TPE-S

Термопластичные стирольные эластомеры *SEBS*. Свойства, характеристики, цены, применение, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература.

Термопластичные стирольные эластомеры *SBS*. Свойства, характеристики, цены, применение, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература.

TPE-E

Термопластичные полиэфирные эластомеры *TPE-E*. Свойства, характеристики, применение, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература (новая информация).

TPE-A

Полиэфирблокамид (*PEBA*). Свойства, характеристики, цены, применение, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература.

POP (POE)

Термопластичные пластомеры (*POP, POE*). Свойства, характеристики, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература (новая информация).

Interpolymer

Этиленстирольный интерполимер (*ESI*). Свойства, условия переработки, торговые марки и изготовители, поставщики, рекомендуемая литература (новая информация).

9.3. Полимерные добавки — на сайте *rcc.ru*

Полимеры, производимые сегодня на мировом рынке, разделены по 4 основным группам: эластомеры, термоэластопласты, термопласты, реактопласты.

До 60% полимерных добавок для модификации и переработки пластмасс и эластомеров Россия импортирует из-за рубежа, и все большее количество отечественных производств ориентируется в своей деятельности на экспорт. В этой ситуации успешность предприятия напрямую зависит от наличия необходимой информации: и экспортеры, и импортеры одинаково нуждаются в информационной поддержке внешнеэкономической деятельности.

С декабря 2001 года впервые в российском секторе интернета по адресу <http://specialchem.rcc.ru> организован доступ к 9,5 тысячам полимерных добавок и каучуков от 260 ведущих мировых производителей.

В базе данных представлены сведения о производимых в крупнейших компаниях мира полимерных соединениях, терминология приведена в строгое соответствие с международными стандартами. База данных постоянно дополняется и обновляется специалистами европейской исследовательской компании *SpecialChem Polymer Additives and Masterbatches*, лидера отраслевого информационного рынка.

Тысячи полимерных добавок и каучуков разделены специальным классификатором. Так, группа «Добавки» представлена в категориях*: активатор склеивания,

* Приводится в сокращенном виде.

противовспениватель (пеногаситель), антиокислитель, антиозонант, противоскользкое вещество, антистатик, вещество, препятствующее прилипанию (антиадгезив), порообразователь/пенообразователь, осветляющее вещество, аппрет/связывающее вещество, структурирующее вещество, дезодорант, влагопоглотитель, наполнители/разбавители/упрочнители, пламязамедлитель, выравнивающий (глянцеконтролирующий) агент, модификатор ударопрочности, инфракрасный фильтр, ингибитор, выравниватель, смазка, матирующий агент/глянцеватель, термостабилизатор, антиокислительная присадка, ядрообразующий агент, образователь оптического блеска, поглотитель кислорода, пластификатор, технологическая добавка, разделительный состав, вещество, способствующее скольжению, дымоподавитель, стабилизатор, диоксид титана, поглотитель ультрафиолета, модификатор вязкости, вулканизатор, воск, смачивающее вещество.

Для поиска по базе необязательно заполнение всех полей и выбор удаленных подгрупп. Как бы ни был сформирован поисковый запрос — предельно конкретно или достаточно широко, база предоставляет все возможные ответы.

Приложение 10

Краткий обзор оконных систем различных производителей

REHAU (<http://www.rehau.ru>). Профили *REHAU* позволяют использовать широкую гамму конструкций стеклопакетов шириной 32–41 мм. Специально для России была разработана оконная коробка с глубиной 115 мм, которая решает проблему промерзания откосов и создания чистого, эстетичного и недорогого примыкания.

Одной из новых систем профилей для изготовления фасадных систем является система *REHAU POLYTEC 50*. Система отличается простотой в изготовлении, хорошей и надежной тепло- и звукоизоляцией, элегантным внешним видом и профессиональной комбинацией свойств различных материалов: стали, алюминия и ПВХ. Проектная долговечность профиля *REHAU* даже в северных регионах России составляет более 30 лет.

KBE (<http://www.kbe.ru>). На российском рынке *KBE* активно работает с 1996 г. Строительные нормы не существовавшей ранее отрасли — оконного строительства из ПВХ — были разработаны при непосредственном участии специалистов *KBE*.

Сегодня все оконное строительство РФ и ряда стран СНГ регламентируется тремя ГОСТами: ГОСТ №23166-99 «Блоки оконные»; ГОСТ №30674-99 «Блоки оконные из поливинилхлоридных профилей»; ГОСТ №30676-99 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков».

Долговечность ПВХ-профилей *KBE* достигает 42 условных лет эксплуатации. Он пригоден для использования в климатических районах со средней температурой ниже –20 °С.

Сегодня фирма продвигает на российский рынок пластиковые окна нового поколения — систему Элита, которые обладают значительно более высокими эксплуатационными показателями. Новые окна, прежде всего, дают выигрыш в сохранении тепла. Конструктивно новые оконные профили имеют ширину 70 мм и 5 воздушных камер. Теплоизоляционные качества 5-камерных переплетов на 30% выше по сравнению с 3-камерными профильными системами. Благодаря большей ширине профилей, в них можно монтировать стеклопакет большей ширины, что в целом дает значительную прибавку в экономии тепла.

VEKA (<http://www.veka.ru>). Компания *VEKA* — один из лидеров по производству и продажам ПВХ-профилей в мире. В настоящее время ее марка характеризуется как высокотехнологичная, с единым стандартом качества, независимо от страны производства профиля.

Сегодня фирма выпускает 4 оконных системы: *Soft-line*, *Topline*, *Euroline* и *Topline Plus*. ПВХ-профили обладают приятным блеском и одновременно низкой чувствительностью к внешним воздействиям. Уплотнители в окнах системы практически незаметны.

Для устранения контакта влаги с металлическими армирующими деталями используется водоотводный канал такой формы, которая совершенно исключает соприкосновение фурнитуры с водой.

На заводах фирмы используется самая современная экструзионная техника и непрерывный контроль качества, которые позволяют добиться идеальной геометрии профиля. Все стенки и перегородки ПВХ-системы стабильны, отклонения допускаются лишь на уровне десятых долей миллиметра.

ALUPLAST (<http://www.aluplast.ru>). Концерн **ALUPLAST** в настоящее время занимает третье место в Европе по выпуску ПВХ-профилей для производства окон и дверей. Оконные системы этой фирмы применяются как в массовом домостроении, так и при постройке эксклюзивных объектов. Отличительной чертой окон *Aluplast* является наличие многорезонаторной системы с многокамерными профилями. Оконная система *Aluplast* обеспечивает оптимальную герметичность швов и сопротивление воздействию осадков.

С наружной стороны ПВХ-профиль обычно покрывается декоративной пленкой. Все профили изготавливаются из ударопрочного НПВХ по *DIN 7748-PVC-U*. На сегодняшний день фирма **ALUPLAST** имеет шесть систем оконных профилей (*Ideal* 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000), начиная от простого оконного профиля, предназначенного для окон подсобных помещений, и заканчивая одной из последних новинок, запущенных в производство. Это 6-камерная система с монтажной глубиной 80 мм, имеющая три контура уплотнения и сглаженные внешние контуры (*Round Line*).

Долговечность ПВХ-профилей составляет более 50 лет при эксплуатации в условиях холодного климата в северных регионах. На мировом и российском рынках оконных систем ПВХ-профили фирмы **ALUPLAST** считаются высококачественной, технологически хорошо развитой продукцией.

GEALAN (<http://gealan.de>). Фирма **GEALAN WERK Fickensctier GmbH** одна из первых предложила на российский рынок широкие 74-мм системы ПВХ-профилей для изготовления окон с 4 воздушными камерами. Оконные системы из такого ПВХ-профиля существенно отличаются по своему качеству от обычных окон. Прежде всего, это дает возможность изготавливать окна больших размеров без изменения геометрии профиля для любых самых суровых российских климатических условий.

Высокотехнологичные и унифицированные оконные системы *Gealan* пользуются репутацией ПВХ-продуктов, изготовленных с помощью передовых технологий XXI в.

PLAFEN (<http://www.plafen.com>). Геометрия и рецептура ПВХ-профиля разрабатывались сотрудниками немецкой фирмы специально для России и соответствует ГОСТ 30673-99. В результате профиль *Plafen* имеет прекрасную изначальную белизну и устойчивость к изменению цвета в течение более 40 лет эксплуатации.

Кроме основных, система *Plafen* имеет широкий ассортимент (24 наименования) вспомогательных профилей, необходимых для монтажа нестандартных конструкций. Благодаря этому обеспечивается исключительная точность ПВХ-профилей и их способность выдерживать большие нагрузки в течение длительного времени. Окна, изготовленные из этих профилей, удовлетворяют самым строгим стандартам и обладают прекрасными тепло- и звукоизолирующими свойствами.

Профили *Plafen* имеют очень узкую лицевую сторону, что делает окна более привлекательными, благодаря высокому значению коэффициента светопропускания. Съёмный контур 3-го уплотнения препятствует проникновению влаги в фурнитурный паз.



THYSSEN. THYSSEN POLYMER GmbH — единственная крупная фирма, которая производит ПВХ-профили для Европы и России только в Германии. По количеству различных ПВХ-систем (более 10), а также по разнообразию профилей **THYSSEN** опережает всех других производителей. Элегантность и повышенная прочность всех конструкций ПВХ-окон являются отличительными чертами всех профильных систем **THYSSEN**.

Наряду с элегантным внешним видом, профиль **THYSSEN** имеет ряд технических достоинств: фальц, скошенный под углом 45° , придает профильным конструкциям изящность и способствует стоку воды; капроновая нить, помещенная в оконные резиновые уплотнители, предохраняет их от излишнего расширения и сжатия при температурных перепадах. Все оконные системы **THYSSEN** имеют повышенную способность выдерживать большие статические нагрузки. Армирующий металл в рамном профиле расположен таким образом, что воздействие холода на него минимально.

Универсальность основных видов профиля позволяет изготавливать окна и балконные двери из одного вида профиля с использованием самой различной фурнитуры.

Профиль **THYSSEN** великолепно зарекомендовал себя в реальных условиях эксплуатации в городах Сибири и Урала. Его долговечность — 40 лет.

TROCAL (<http://www.ht-troplast.de>). Компания **HT TROPLAST AG** — постоянный пионер на рынке ПВХ-профилей на протяжении десятилетий. Ей принадлежат патенты на механические соединения импостов и технологию **RECICLING**, на технологию особого покрытия профиля **ACRYL COLOR**, которая позволяет методом соэкструзии наносить светостойкое покрытие в 15 цветовых вариантах на внешнюю поверхность профилей.

Благодаря научно-практическому подходу к физико-химическим аспектам состава и к особенностям конструкции профилей гарантируется долговечность профильных систем компании более 50 лет в условиях холодной климатической зоны. Уплотнительные элементы профильных систем **TROCAL** испытаны на срок более 20 лет эксплуатации в холодной климатической зоне.

В системе профилей **TROCAL** принципиально выделяют два класса:

1) **TROCAL Comfort** — система с двухконтурным уплотнением (уплотнение привора);

2) системы со средним уплотнением (серия 900, серия **TROCAL INNONOVA 70**).

Особенности первой системы позволяют применять стеклопакеты шириной до 34 мм. При этом их монтажная ширина составляет 62 мм. Долговечность ПВХ-профилей более 50 лет. Уникальное вспененное уплотнение стеклопакета снижает риск его раскалывания при транспортировке и эксплуатации. Коэффициент термосопротивления с металлическим усилителем сочетания коробка-створка составляет $0,61 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Системы со средним уплотнением полностью исключают продувание и поступление пыли в помещение. Одна из них — система **TROCAL 900** — обеспечивает использование стеклопакетов шириной до 52 мм. Долговечность этих ПВХ-профилей системы более 50 лет, а долговечность уплотнений более 21 года. Коэффициент термосопротивления с металлическим усилителем сочетания коробка-створка $0,71 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.



Система *TROCAL 900 RELIEF* сохраняет все преимущества серии 900, но при этом монтажная ширина коробки увеличивается до 115 мм. Особенная конструкция металлического усилителя коробки исключает проблемы с геометрией при перепадах температур. Во всех сериях *TROCAL* можно применять стеклопакеты с любыми типами стекол и заполнений.

Новинка для российского рынка — система *TROCAL INNNOVA 70*. Ее особенностями — повышенная долговечность и удобство монтажа. Максимальный размер стеклопакета — 60 мм. Пятикамерная коробка и специальное термоуплотнение обеспечивают повышенную теплоизоляцию.

PROPLEX [46] (<http://www.proplex.ru>). Конструкция системы профилей *PROPLEX* достаточно проста и технологична, что позволяет изготавливать окна для любых архитектурных проемов.

Конструкция и расположение камер исключают возможность промерзания профиля зимой. Армирующие металлические вставки расположены между двумя камерами, что предотвращает перетекание тепла по металлу. Сам армирующий профиль с одной стороны имеет щель, предназначенную для компенсации изменения линейных размеров при колебаниях температуры. Внутри профиля усилительный вкладыш располагается прорезью к внешней стороне, так как именно снаружи происходят резкие скачки температуры.

Специальные канавки на скрытых плоскостях ПВХ-профиля облегчают крепеж фурнитуры и усилительного вкладыша, не позволяя срываться саморезам и точно обозначая места их крепления. Наличие приливов на створках обеспечивает надежное крепление саморезов для петель.

ПВХ-профиль *PROPLEX* снежно-белого цвета с матовой небликующей поверхностью и широкой гаммой дополнительных цветов решен без излишней вычурности, в сдержанном технологическом ключе.

PLASTMO (<http://www.plastmo.ru>). Профили фирмы *PLASTMO* системы *INDEX* имеют базовую ширину 62 см. Конструктивно профили имеют не менее 3 камер, центральная из которых армирована оцинкованной сталью толщиной 1,5–2 мм, что позволяет обеспечивать высокие теплоизоляционные свойства и прочность всей конструкции.

Широкий ассортимент трехлепестковых штапиков позволяет устанавливать заполнение светового проема от 6 до 38 мм без дополнительных расширителей, что уменьшает трудоемкость технологического процесса и обеспечивает высокую герметичность всей конструкции окна. Кроме того, уплотнение притвора имеет трубчатую конструкцию с лепестком, гарантирующую уплотнения от продувания и от «слеживания», а также увеличивающую его долговечность.

Система *INDEX* позволяет изготавливать широкий спектр оконных, дверных и фасадных конструкций при использовании минимального количества комплектующих.

Имеется возможность использования широкой рамы (115 мм) для панельного домостроения — пятикамерная конструкция более адаптирована к климатическим условиям средней полосы и севера России, так как армирующая коробка находится в четвертой камере снаружи. Полностью исключено промерзание в месте стыка рамы со стеной по сравнению со стандартными рамами, поскольку ширина 115 мм позво-



ляет использовать большой слой изоляции и отодвигает плоскость остекления (а следовательно, и точку росы) на 53 мм вглубь помещения.

Рама 115 мм соответствует требованиям современных строительных норм и полностью исключает возникновение мостика холода, а также позволяет избежать применения дополнительных элементов, усложняющих конструкцию и монтаж оконных блоков. За счет своей геометрии рама 115 мм может выдерживать более высокие ветровые нагрузки, чем стандартные рамные профили. Прочность, устойчивость и высокие противоударные характеристики обеспечиваются толстыми стенками профиля, его внутренней структурой и использованием стального армирования с гальваническим покрытием. Расположенные под углом внешние фасадные элементы окон отталкивают грязь и влагу.

Упругие и долговечные прокладки *EPDM* и специальная 3-камерная конструкция защищают от сквозняков и шума независимо от погоды. Оригинальный дизайн и эффективная конструкция обеспечивают профилю *PLASTMO* высокие позиции на российском рынке изделий из ПВХ.

SCHUCO. На российском рынке ПВХ-профилей высокой репутацией пользуются системы *SCHUCO* под названием *Corona*. Наиболее распространена из них *Corona AS-60* с внешними прижимными уплотнителями, трехкамерной конструкцией и монтажной глубиной 60 мм. Окна системы *Corona AS-60* находят применение по всей России, в любых самых экстремальных климатических условиях. С появлением на российском рынке системы *Corona CT-70* сказано новое слово в области дизайна окон. Вогнутая с внешней стороны и на четверть смещенная относительно рамы створка в комбинации с узкими уплотнителями светло-серого цвета является визитной карточкой всей системы. Эта система с внешними прижимными уплотнениями имеет пятикамерную конструкцию и монтажную глубину 70 мм, что определяет повышенную теплоизоляцию и значительно снижает затраты на отопление. По результатам испытаний они относятся к 1 группе рамных материалов (*DIN 4108*), обеспечивая отличную теплоизоляцию. Предписанные стандартом коэффициенты сопротивления теплопередаче достигаются за счет системной технологии и типа остекления. Профили системы при применении соответствующего стекла обеспечивают звукоизоляцию 45–49 дБ (до класса 5 по *DIN 4109*).

SPECTUS. Окна из английского ПВХ-профиля зарекомендовали себя как конструкции с высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами. Они обладают прочностью и комфортностью в эксплуатации. Оконный ПВХ-профиль, который применяет *SPECTUS SYSTEMS Ltd*, — это четырехкамерный *Spectus TK60* со стальным армированием толщиной 60 мм. Именно четыре воздушных камеры в структуре профиля и вмонтированные в него соэкструдированные уплотнители, устойчивые к воздействию климатических факторов, являются отличительной особенностью этой марки профиля от других окон из ПВХ. По своим показателям воздухопроницаемости окна из ПВХ-профиля *Spectus TK60* можно применять в любом климатическом районе России как в жилых, так и промышленных зданиях.

Гарантия на ПВХ-профиль *Spectus TK60* составляет 25 лет. Однако при правильной эксплуатации изделия срок его службы значительно больше.

PLUS TEC. Немецкую фирму *PLUS PLAN Kunststoffe* считают крупнейшим поставщиком технологий производства ПВХ-окон. Более чем в 20 странах выпускаются окна и профили из ПВХ по новейшим технологиям фирмы *PLUS PLAN*. Ежедневно в мире производится более 10000 окон и дверей из профилей *PlusTec*. В России производством окон из профилей *PlusTec* занято 26 фирм. ПВХ-профиль *PlusTec* фирмы *PLUS PLAN* изготавливается из композиций с нетоксичными стабилизаторами на основе Ca-Zn .

Окна из трех- и четырехкамерных систем *PlusTec* гарантируют превосходную тепло- и звукоизоляцию. Значение сопротивления теплопередаче в таких окнах в зависимости от конструкции используемого теплоизолирующего стеклопакета находится в диапазоне $0,55\text{--}0,83 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (при норме 0,55). Комбинированная 7-камерная система *PlusTec plus* имеет ширину 110,5 мм. В комплектации с 44-миллиметровым стеклопакетом, собранным с двумя низкоэмиссионными стеклами, коэффициент сопротивления теплопередаче окна *PlusTec plus* равняется $1,25 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; этот показатель в два с половиной раза выше требований Российского ГОСТа. Соответствие ПВХ-профилей фирмы *PLUS PLAN* высоким стандартам качества подтверждено сертификацией по *DIN ISO 9002*, а также сертификатами качества других стран.

ARTEC. Фирма *ARTEC* выпускает широкий ассортимент ПВХ-профилей для пластмассовых окон. Профили толщиной 60, 70 и 77 мм со стеклопакетом толщиной до 70 мм обеспечивают повышенную тепло- и звукоизоляцию. Используется 3-камерная конструкция; ее сопротивление теплопередаче без стального армирования $0,71 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, а с армированием — $0,66 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Геометрия камер оптимизирована для достижения максимальной теплоизоляции. В новой серии *Comfort* для повышения шумо- и теплоизоляции применяется 5-камерная конструкция. Фальц на раме и створке сделан со скосом для надежного отвода влаги и удобства удаления пыли.

Испытания уплотнителей показали их надежность при температурах до -60°C . Срок эксплуатации окон из ПВХ-профилей фирмы более 25 лет.

SALAMANDER. Марка фирмы *SALAMANDER INDUSTRIE* хорошо известна на российском рынке ПВХ-профилей. Профиль системы *Design 2D* изготовлен из высококачественного ПВХ, гарантирующего долговечность, непревзойденную белизну и глянцевый блеск. Варианты 3- и 4-камерных профилей позволяют достичь оптимальной защиты от взлома и повышенной теплозащиты. Великолепие форм и технических решений воплощает система *Design 3D*. Идеальная округлость ПВХ-форм профиля с внешней и внутренней стороны придает окну неповторимый вид. Пятикамерная конструкция системы с монтажной шириной 76 мм и трехконтурным уплотнением дают не только преимущество в теплозащите, по сравнению с трехкамерными системами, но и значительно улучшают противовзломные показатели окна.